

PAUL ANDRÉ

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÕES NA
RECONSTRUÇÃO DA INFRAESTRUTURA VIÁRIA DO HAITI**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês

Coorientador: Eng. Civil Matheus
Felipe Marcon

Florianópolis
2014

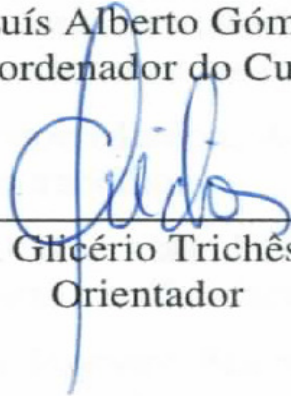
Paul André

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÕES NA RECONSTRUÇÃO DA INFRAESTRUTURA VIÁRIA DO HAITI

Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, julho de 2014.

Prof. Luís Alberto Gómez, Dr.
Coordenador do Curso



Prof. Glicério Trichês, Dr.
Orientador

Eng. Civil Matheus F. Marcon
Coorientador

Banca examinadora:

Prof^ª. Janaíde Cavalcante Rocha, Dr^a ECV/UFSC

Prof. Luciana Rohde, Dr^a. ECV/UFSC

Agradecimentos

A Deus, o SENHOR, por Ele existir e por me ter permitido conhecê-Lo melhor durante esta fase na minha vida– fato o qual também contribuiu grandemente para que este trabalho se tornasse realidade.

Aos meus pais especialmente, Ilord André e Inocia Douyon, pelo apoio, atenção, carinho todo sacrifício que fizeram para moldar a minha personalidade e meus valores.

Ao meu orientador, Prof. Dr Glicério Trichês pela orientação, pela amizade e disponibilidade permanente para me atender durante a realização deste trabalho.

A minha noiva Neldarine Isaac pelo seu suporte e seu carinho, suas palavras de estímulo durante o tempo de estudo.

Aos meus irmãos Lucel André, Louinord André, Dieunord André, e irmãs que investiram sem reserva na construção da minha vida.

Ao meu amigo Matheus Felipe Marcon, Adouzingo Almeida, pelo seu apoio para a realização deste trabalho.

A todos os professores da Universidade Federal de Santa Catarina pelos seus ensinamentos que formam uma fundação sólida na minha vida.

Ao meu amigo de infância Raynord Mayard que durante toda minha vida assumiu um papel inexplicável.

Aos meus amigos haitianos na UFSC que me servem um grande reforço para esta construção.

Ao técnico do laboratório de pavimentação da UFSC, Jonathan Guimarães da Costa, pelo seu apoio na execução desta pesquisa.

Aos todos que contribuíram imensamente para a superação desta fase, me apoiando, incentivando ou mesmo por apenas compreender o quão significativo é a presença deles.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a viabilidade técnica do uso de agregado reciclado de resíduo sólido da demolição da construção na recuperação da infraestrutura viária do Haiti. Inicialmente, procurou-se caracterizar o tipo de entulho da construção gerado pelo terremoto do Haiti, no que diz respeito a sua constituição. Diferentemente do Brasil, no entulho da construção e resíduo de demolição do Haiti não há a presença de cerâmica vermelha. Assim, procurou-se em Florianópolis resíduos de construção e de demolição que não apresentassem este tipo de material na sua composição. Selecionou-se o resíduo de demolição proveniente da recuperação de passeios e calçadas do campus da UFSC. O material foi submetido a ensaios de laboratório que objetivaram caracterizá-lo fisicamente e verificar seu comportamento mecânico em ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia, resistência à compressão e resistência à tração para diferentes teores de cimento. Com os resultados obtidos, foi realizado o dimensionamento hipotético de estruturas de pavimentos flexíveis e semirrígido para três níveis de tráfego esperados para as rodovias do Haiti. Os valores obtidos demonstram que o agregado reciclado é passível de uso em construção de pavimentos.

ABSTRACT

This work presents a study on the technical feasibility of using recycled aggregate of solid waste from the demolition of the building on the recovery of road infrastructure in Haiti. Initially, we sought to characterise the type of construction debris generated by the earthquake in Haiti, as regards its constitution. Unlike Brazil, in the debris from construction and demolition waste in Haiti, there are no traces of red ceramic. Thus, we searched in Florianopolis' construction and demolition waste for debris that does not possess such material in its composition. The residue selected was from UFSC campus' sidewalks. The material was subject to laboratory tests that aimed to characterise it physically and verify its mechanical behaviour in compaction tests, California bearing ratio, resistance to compression and to traction for different levels of cement. With the results, the hypothetical design of structures of flexible and semi-rigid pavements for the three levels of traffic expected for the highways of Haiti was elaborated. The values obtained show that the recycled aggregate may be used in pavement construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição dos diferentes fluxos de resíduos classificados de acordo com estatísticas estabelecidas em 2004, no âmbito do plano de gestão cantonal de materiais residuais	21
Figura 2: Distribuição provável de materiais de construção minerais reciclados nos três principais compartimentos de consumo em 2004 ...	23
Figura 3: Exemplo de processo de produção de materiais reciclados em Bourgogne.....	30
Figura 4: Exemplo de processo de produção de materiais reciclados em Bourgogne	31
Figura 5: Domínio de aplicação de cada material	34
Figura 6: Produção anual de resíduos de construção e de demolição na Europa	36
Figura 7: Destinação de resíduos de construção e demolição na Europa	37
Figura 8: Composição dos resíduos de construção e demolição em Vermont em peso).....	39
Figura 9: Visão detalhada sobre o nível de reciclagem de resíduos em Quebec	41
Figura 10: Mostra a seção transversal de um pavimento flexível.....	48
Figura 11: Distribuição de carga nos pavimentos flexíveis.....	48
Figura 12: Seção transversal de um pavimento rígido.....	49
Figura 13: Distribuição de carga nos pavimentos rígidos.....	50
Figura 14: Materiais tratados com ligantes de um pavimento Semirrígido.....	51
Figura 15: Determinação da espessura do pavimento	53
Figura 16: Correlação entre massa específica aparente e absorção de água de fases de agregado graúdo reciclado da usina de Santo André (SP).....	71

Figura 17: Absorção de água por imersão, após 24 h de fases do agregado graúdo de RCD reciclado da usina de Santo André.....	72
Figura 18: Curvas de compactação do RCD obtida com energia Proctor intermediário.....	78
Figura 19: Resistência à compressão simples dos corpos de provas aos 3 dias.....	86
Figura 20: Resistência à compressão simples dos corpos de provas aos 3 dias.....	86
Figura 21: Resistência à compressão simples dos corpos de provas aos 3 dias.....	87
Figura 22: Resistência média à compressão.....	88
Figura 21: Variação da resistência à tração com o teor de cimento e idade de cura.....	92
Figura 22: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 2 \times 10^7$	94
Figura 23: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 5 \times 10^6$	95
Figura 24: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 1 \times 10^6$	98
Figura 25: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 2 \times 10^7$	96
Figura 26: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 5 \times 10^6$	99
Figura 27: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 1 \times 10^6$	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Volume de resíduos aceitos em Vaud, durante o ano de 2004.....	21
Tabela 2: Volume de resíduos aceitos e produtos reciclados vendidos em Vaud, em 2014	22
Tabela 3: Diferentes aplicações de materiais reciclados nas pavimentações.....	25
Tabela 4: Extrato da lista de resíduos inertes e condições de obtenção (Referindo-se ao Anexo I do decreto de 28 de Outubro 2010).....	28
Tabela 5: Agregados reciclados produzidos.....	31
Tabela 6: Características de GR0 e GR1, seu emprego como materiais de terraplenagem e camada de reforço de subleito referências.....	32
Tabela 7: Características de materiais.....	33
Tabela 8: Domínio e precauções de emprego.....	35
Tabela 9: Quantidades estimadas de resíduos nos USA em milhares de toneladas.....	37
Tabela 10: Camada mínima de revestimento betuminoso.....	52
Tabela 11: Coeficiente de equivalência estrutural de materiais.....	54
Tabela 12: Expressões para obtenção dos fatores de equivalência de operações para diferentes tipos de eixos (USACE).....	58
Tabela 13: Expressões matemáticas para obtenção dos fatores de equivalência de operações para diferentes tipos de eixos (AASHTO)..	58
Tabela 14: Levantamento de custos da gestão corretiva de alguns municípios de São Paulo.....	61
Tabela 15: Propriedades de agregados de concreto reciclado.....	72
Tabela 16: Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos.....	73

Tabela 17: Faixa granulométrica de agregado reciclado do DEINFRA/SC	75
Tabela 18: Composição granulométrica do material	76
Tabela 19: Composição granulométrica.....	76
Tabela 20: Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em diferentes RCD.....	79
Tabela 21: Resultados do ensaio de CBR.....	81
Tabela 22: Número de corpos de provas por teor de cimento.....	82
Tabela 23: Resultado de ensaio de Resistência à Compressão Simples (em MPa).....	85
Tabela 24: Resistência média à compressão simples (MPa).....	87
Tabela 25: Resistência à compressão simples de RCD (Motta, 2005)...	88
Tabela 26: Resistência média à tração por compressão diametral.....	91
A Tabela 27: Apresenta um resumo das estruturas dimensionadas.....	101

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Semelhança entre os materiais de origem natural e materiais de reciclagem.....	24
Foto 2: Materiais estocados para reciclagem na França.....	27
Foto 3 : Materiais num plataforma de reciclagem.....	27
Foto 4: Entulho de demolições no Haiti.....	63
Foto 5: Entulho no estado original originado da reconstrução de calçadas na UFSC.....	65
Foto 6: Catação realizada em recicladora de material separada magneticamente Belo Horizonte (MG).....	66
Foto 7: lançamento de resíduos de construção no britador de impacto de Ecicladora de Estoril vista de um britador primário em Belo Horizonte (MG).....	67
Foto 8: Britagem manual e martelo usado.....	67
Foto 9: Processo de britagem mecânica.....	68
Foto10: Vista inferior de britador em Jundiaí	68
Foto 11: Separação granulométrica.....	68
Foto 12: Peneiramento do material.....	69
Foto 13: Granulometria do material.....	74
Foto 14: Pesagem dos agregados.....	77
Foto 15: Peso do cimento.....	77
Foto 16: Homogeneização do material.....	77
Foto 17: Compactação do material.....	78
Foto18: Ensaio de CBR.....	80
Foto 19: Material em preparação.....	82
Foto 20: Moldes usados.....	82

Foto 21: Material preparado para o corpo de prova.....	83
Foto 22: Corpo de prova moldado.....	83
Foto 23: Corpos de prova na camada úmida.....	83
Foto 24: Corpos de prova pronto para rompimento.....	84
Foto 25: Corpo de prova na prensa sob a força de compressão.....	84
Foto 26: Corpos de prova rompidos à compressão.....	84
Foto 27: Moldagem dos corpos de prova.....	90
Foto 28: Corpos de prova em ensaio de tração por compressão Diametral.....	91

LISTA DAS SIGLAS

RCD: Resíduos de construção e de demolição.

PGCar: programa de Gestão de Carreira.

ADEME: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
(Agência de Meio Ambiente e do domínio de Energia).

CBR: Índice de Suporte Califórnia.

MR: Módulo de Resiliente.

USACE: Corpo de Engenheiros do Exército Norte Americano.

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation
Officials.

σ_d : Tensão desvio.

re: Deformação específica vertical recuperável.

BGTC - Brita Graduada Tratada com Cimento.

M_{unida} : massa, ao ar do agregado na condição saturada superfície seca.

M_{seca} : massa, ao ar, do agregado seco em estufa.

DEINFRA: Departamento Estadual de Infraestrutura.

ACR: Agregado Reciclado de Concreto.

AR: Agregado Reciclado.

ARCV: Agregado Reciclado de Telha Cerâmica Vermelha.

RCS: Resistência à Compressão Simples.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FOTOS	viii
Lista das Siglas	x
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Historicidade	19
2.2 Aplicação no mundo	20
2.2.1 Caso de Cantão de Vaud na Suíça.....	20
Volumes et types de produits transformés et écoulés en m³	22
2.2.2 Caso de Bruxelas.....	25
2.2.3 Caso da França	26
2.2.4 Caso da União Europeia.....	36
2.2.5 Caso de USA.....	37
2.2.6 Caso de Canada.....	39
2.2.7 Aplicação no Brasil.....	41
2.3 Definição e Classificação do RCD.....	44
3. PAVIMENTOS	47
3.1 Tipos de Pavimentos	47
3.1.1 Pavimento flexível	47
3.1.2 Pavimento Rígido.....	49

3.1.3 Pavimento semirrígido	50
3.2 Dimensionamento de Pavimentos	51
3.2.1 Método para Dimensionamento de Pavimento Flexível DNER/81.....	51
3.2.2 Método TECNAPAV/94.	54
3.2.3 Método para Dimensionamento de Pavimento Rígido PCA/84	55
3.3 Definição de Tráfego.....	56
3.4 Módulo Resiliente	58
4. PROBLEMAS GERADOS PELA MÁ GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO HAITI	60
4.1 Composição de Entulhos no Haiti	62
5. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE PESQUISA	64
5.1 Processo de Reciclagem	65
5.2 Caracterização Física do Material Reciclado	70
5.3 Massa Específica Aparente e Real	70
5.4 Capacidade de Absorção d'Água	71
5.5 Granulometria do Material	74
5.6 Curva de Compactação.....	76
5.7 Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR).....	80
5.8 Resistência à Compressão Simples	81
5.9 Resistência à Tração Por Compressão Diametral.....	88
6. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO COM MATERIAL RECICLADO	93
6.1 Pavimento Semirrígido.....	93
6.2 Dimensionamento do pavimento flexível.....	96
6.3 RESUMO DO DIMENSIONAMENTO	101

7. CONCLUSÕES.....	103
---------------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

A problemática dos resíduos de construção civil sempre esteve presente no Haiti. No entanto, a partir de 2010, vem recebendo uma maior atenção devido à grande quantidade produzida pelo terremoto. A grande geração de resíduo de construção civil em cidades haitianas tem sido um problema crônico que envolve questões de ordem ambiental, social e financeira, principalmente porque grande parte deste material gerado normalmente é disposta de forma irregular em locais como vias, rios, córregos, terrenos baldios e áreas de mananciais.

Desta forma, descartado ilegalmente, o resíduo de construção pode trazer riscos à população em função de dois aspectos relevantes: atração de transmissores de doenças e entupimento de bueiros e assoreamento dos recursos hídricos, que implicam em um aumento das enchentes nas estações chuvosas.

Ciente de toda a dificuldade que envolve esses resíduos, bem como da real necessidade e urgência de se viabilizar mecanismos para o gerenciamento apropriado do mesmo, este trabalho visa servir como um mecanismo de pesquisa para colaboração nessa busca.

Deste modo, o objetivo principal desse trabalho é mostrar, através de estudo utilizando as tecnologias e normas brasileiras, as principais aplicações de Resíduo de Construção e de Demolição (RCD) em obras civis, particularmente na pavimentação, para poder aplicar na reconstrução da infraestrutura viária do Haiti.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo geral verificar a aplicação de resíduo de construção civil e demolição na recuperação da infraestrutura viária do Haiti.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo precitado, estes específicos foram adotados:

- a) Definir a curva granulométrica a ser usada (composição granulométrica);
- b) Determinação da massa específica aparente e real e absorção do material utilizando a energia Proctor intermediário;
- c) Determinar o Índice de Suporte de Califórnia do material;

- d) Determinar a resistência à compressão e à tração do material para diferentes teores de cimento;
- e) Dimensionar tipos de pavimentos para diferentes níveis de tráfego no Haiti.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTORICO

A construção é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando como subprodutos grande quantidade de entulho mineral.

Tal fato despertou a atenção dos construtores já na época da edificação das cidades do Império Romano e desta época datam os primeiros registros da reutilização dos resíduos minerais da construção civil na produção de novas obras.

Entretanto, só a partir de 1928 começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma mais sistemática para avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de alvenaria britada e de concreto.

Porém, a primeira aplicação significativa de entulho só foi registrada após a segunda guerra mundial, na reconstrução das cidades Europeias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e os escombros ou entulho resultante foi britado para produção de agregado visando atender á demanda na época. Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem de entulho da construção civil.

Embora as técnicas de reciclagem dos resíduos minerais de construção e demolição tenham evoluído. Não se pode afirmar com absoluta convicção que a reciclagem tenha se tornado uma ideia amplamente difundida.

Atualmente na Europa há um desperdício equivalente a 200 milhões de toneladas anuais de concreto, pedras e recursos minerais valiosos. Tal volume de materiais seria suficiente para se construir uma rodovia com seis faixas de rolamento interligando as cidades de Roma, na Itália, a Londres, na Inglaterra (ABRACOM, 2004).

Felizmente, nações tecnologicamente desenvolvidas, como EUA, Holanda, Japão, Bélgica, França e Alemanha, entre outros, já perceberam a necessidade de reciclar as sobras da construção civil e tem pesquisado o assunto intensamente visando atingir um grau de padronização dos procedimentos adotados para a obtenção dos agregados, atendendo desta forma aos limites que permitem atingir um nível mínimo de qualidade.

Em países como Holanda 70% dos RCD são reciclados e na Alemanha 30%. Na Dinamarca, Copenhague recicla 25% de entulho de demolição, pois o país tem escassez de material granulado existindo uma sobretaxa de 10% sobre o consumo de agregados naturais favorecendo a reciclagem pelas próprias mineradoras (ABRACOM 2004).

2.2 APLICAÇÃO NO MUNDO

Como citado, muitos países sentem a necessidade de reutilizar os entulhos, seja nas construções civis, seja na construção de pavimentos. Hoje, isso faz parte de muitas leis e normas dos países no mundo. Com alguns estudos de casos mostra-se o seu emprego em alguns países.

2.2.1 Caso de Cantão de Vaud na Suíça

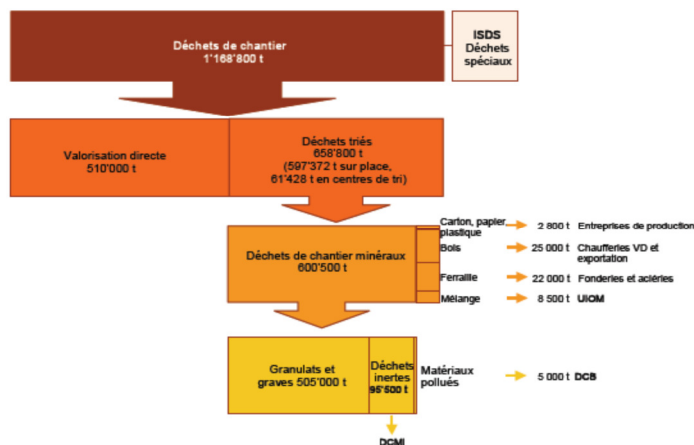
Em 2006, o conselho do estado suíço aceitou o programa de Gestão de Carreira (PGCar 2006) na correspondência de um pedido adicional de realizar um estudo sobre o potencial de substituição de agregados cascalhos e esmagados ou reciclados no cantão (SESA, 2007).

Inicialmente, o estudo examinou as normas legais, regulamentares e que regem a produção e uso de materiais minerais naturais e reciclados a partir de resíduos. Em seguida, avaliou o estado da situação atual da produção de cascalhos naturais no Cantão, destacando a escassez iminente.

O estudo também avaliou a quantidade de materiais de demolição atualmente reutilizada na construção, mostrando que mais de 80% dos materiais minerais são reciclados (projetos com uma produção total de cerca de 358.000 m³ de agregados reciclados em 2004). Sua participação na substituição de materiais de pedra natural era de 18,5%. Esta contribuição pode ainda alterar-se a 20%, em médio prazo, e, possivelmente, de 25% em longo prazo, dependendo das condições e tendências do mercado. Estes números resultam das estatísticas anuais coletados a partir de cinquenta empresas de Vaud envolvidas na reciclagem e a sua análise à luz do estudo específico. Na comparação inter-cantonal, o nível de Vaud é caracterizado como bom.

Em 2004, a produção de entulhos de construção de Vaud foi avaliada em, aproximadamente, 1,17 milhões de toneladas (Figura 1).

Figura 1: Distribuição dos diferentes fluxos de resíduos classificados de acordo com estatísticas estabelecidas em 2004, no âmbito do plano de gestão cantonal de materiais residuais.



Fonte: Pesquisa SESA, os dados fornecidos pelos produtores valdenses.

Dos 1,17 milhões de toneladas de resíduos de construção, 510 mil toneladas foram de projetos de reutilização direta no campo. O restante consistia de cerca de 660 mil toneladas de resíduos indiferenciados. Uma vez removidos papel, papelão, madeira, plástico e sucata de metal, havia cerca de 600 mil toneladas de depósitos de resíduos minerais (SESA, 2007).

Tabela 1: Volume de resíduos aceitos em Vaud, durante o ano de 2004.

Ano 2004	Volume e tipos de entulhos aceitados em m³				
	Entulhos betuminosos	Concreto	Agregados	Outros	Total
Modo de tratamento					
Revestimento reciclado com cal	0				0
Reutilizado no campo	2 900	42 437	8 845	0	54 182
Reciclado no site fixo	34 750	179 560	71 439	31 238	316 987
Total	37 650	221 997	80 284	31 238	371 169

Fonte: Pesquisa SESA, os dados fornecidos pelos produtores valdenses.

Estes resíduos foram transformados em, aproximadamente, 500 mil toneladas de agregados reciclados (cerca de 358.000 m³). Cerca de 95 mil toneladas (75 mil m³) foram depositados em aterro para resíduos inertes, enquanto outras 5.000 toneladas de materiais contaminados foram para aterro bioativo (SESA, 2007).

Só no cantão de Vaud, estatísticas anuais de 2004 emitidas pela SESA depois de investigação às empresas de reciclagem de materiais minerais deram os seguintes resultados: quarenta e quatro empresas estão atualmente ativas no mercado; onze tratam resíduos no local e quarenta e dois em locais fixos ou praticam os dois modos. Essas empresas já anunciaram ter aceitado um total de 371.000 m³ e ter vendido 358 mil m³ de materiais minerais reciclados.

Em 2004, a quota de resíduos reciclados utilizados na construção de Vaud atingiu o valor de 358.000 m³/ 1.929.000 m³ equivalente a 18.5 % do consumo total de agregados no cantão.

Essa avaliação não leva em conta os materiais da demolição reutilizados diretamente no campo para enchimento de escavações e na construção de aterros e estradas. Tendo em conta os materiais ainda valiosos contidos nos resíduos armazenados em aterros inertes, observaram que 82% do potencial está sendo usado.

A Tabela 2 mostra uma visão mais clara da distribuição dos diferentes agregados reciclados aceitos, processados e vendidos em 2004.

Tabela 2: Volume de resíduos aceitos e produtos reciclados vendidos em Vaud, durante o ano de 2004.

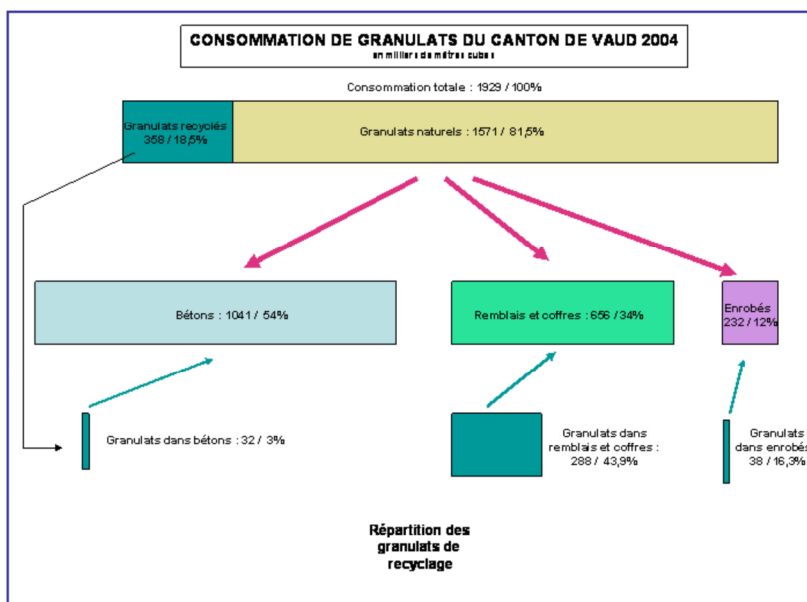
Tipos de produtos	Volumes e tipos de produtos reciclados e vendidos em m ³							
	GBI	GRP	GRA	GRB	GBE	GNT	Outros não especificados	Total
Modo de reciclagem								
Revestimento reciclado com cal	24.294							24.294
Reutilizados no campo	0	5.845			39.537		8.800	54.182
Reciclado no site fixo	12.182	18.265	54.238	126.172	36.225	32.312		279.394
Total geral	36.476	24.110	54.238	126.172	75.762	32.312	8.800	357.870

Fonte: Pesquisa SESA, os dados fornecidos pelos produtores valdenses.

GBI: granulats bitumineux (agregados bituminosos)
GRP: grave de recyclage P (agregados reciclados primários)
GRA: grave de recyclage A (agregados reciclados asfálticos)
GRB: grave de recyclage B (agregados reciclados de concreto)
GBE: granulats de béton (agregados de concreto)
GNT: granulats non trié (agregados não triados).

A Figura 2 mostra a distribuição provável de materiais de construção minerais reciclados nos três principais compartimentos de consumo em 2004.

Figura 2: Distribuição provável de materiais de construção minerais reciclados



Fonte: Pesquisa SESA, os dados fornecidos pelos produtores valdenses.

Os materiais de demolição reciclados são agora a fonte de uma variedade de materiais secundários no mercado, capazes de substituir facilmente as matérias-primas. Alguns exemplos de produtos típicos desenvolvidos por empresas que operam no mercado, mostrados na foto 1, permitem de visualizar por simples olhadas a grande semelhança entre os materiais de origem natural e materiais de reciclagem (Foto 1).

Foto 1: Semelhança entre os materiais de origem natural e materiais de reciclagem



Agregado reciclado 0 – 63 mm



Agregado reciclado 0 – 63 mm (preto)



Agregado natural 0 – 63 mm



agregado reciclado 0 – 32 mm
(preto)



agregado reciclado 0 – 32 mm

Fonte: Pesquisa SESA, os dados fornecidos pelos produtores valdenses.

2.2.2 Caso de Bruxelas

O Governo da Região de Bruxelas-Capital, num decreto de 16 de Março de 1995, relativo à reciclagem obrigatória de certos resíduos de construção e demolição, exige que o empreiteiro garanta a reciclagem de resíduos definidos como a fração de pedra e areia de resíduos de construção, reforma ou demolição de edifícios, estruturas, estradas e outras instalações. Se o contratante não reciclar-se, ele vai indicar-lhes uma empresa especializada em reciclagem (IBGE, Bruxelas 2009).

Além disso, numa outra publicação de 9 maio 1995 relativa à reutilização de resíduos na construção de obras rodoviárias e infraestruturas, o governo autoriza a utilização de materiais reciclados para deferentes aplicações, sujeitos à observância de condições técnicas especificadas. A Tabela 3 mostra as diferentes aplicações de materiais reciclados na construção de estradas (IBGE, Bruxelas 2009).

Tabela 3: Diferentes aplicações de materiais reciclados nas pavimentações

Aterros	Agregado britado de entulhos Entulhos de concreto Entulhos de alvenaria Entulhos misto Entulhos de mistura asfáltica
Soub-base	Agregado britado de entulhos Entulhos de concreto Entulhos misto Entulhos de mistura asfáltica
Base	Agregado britado de entulhos Entulho de concreto com massa volumica no mínimo 1950 kg/m ³ .
Base estabilizadas com cimento	Agregado britado de entulhos Entulhos de concreto Agregado britado de mistura asfáltica.
Concreto magro ou macadame	Agregado britado de entulhos Entulhos de concreto Entulhos misto
Revestimento de pavimento com mistura bituminosa	Agregado britado de entulhos Entulhos de mistura asfáltica
Lajotas	Agregados reciclados de entulhos.

Fonte :IBGE, 2009.

2.2.3 Caso da França

Na França, o sector da construção e obras públicas (BTP) tem gerado sozinho, mais de 250 milhões de toneladas de resíduos em 2008, mais de 30% do total de resíduos, todas as atividades incluídas, e mais de 70% dos resíduos de empresas produzido durante aquele ano no país.

Sozinho, o mundo da construção produziu quase 40 milhões de toneladas, repartidos entre demolição 22 milhões, reabilitação 14 milhões e construção civil 4 milhões (ADEME, 2009).

Segundo Mehu (.....), 34 milhões de resíduos de construções são gerados por ano na França na construção, reabilitação e demolição de obras civis.

Para o Haute-Normandie, uma região na França, a atividade de construção gerou mais de 1.140.000 toneladas de resíduos por ano, das quais 820 mil toneladas são do setor de Obras Públicas e de 320.000 toneladas de sector da construção. A contribuição da nova construção é de forma considerável uma vez que, sozinha, gera quase 120.000 toneladas de resíduos anuais em toda a região.

A totalidade de depósito de resíduos provenientes de atividades de construção em Bourgogne (França) é cerca de 2,7 milhões de toneladas, sendo que 78% são produzidos por obras públicas (2,1 milhões) e 22% em obras de construção. Dos 2,1 milhões de toneladas produzidas por obras públicas, 86% são inertes, incluindo terras de escavação de terrenos naturais que não são reutilizados em terraplenagem no sítio.

A produção de resíduos de obras públicas ou de construção é quase proporcional à população do departamento. As áreas urbanas são as principais fontes de produção. Dos 1.625.000 habitantes da Borgonha; a Saône et Loire, com 546.000 habitantes, representa 33.6 %; a Côte d'Or, com 514.000 habitantes, representa 32.1 %; a Yonne, com 343 000 habitantes, representa 21.1 %; e a Nièvre, com 222 000 habitantes, produz 13.7 %.

No entanto, na Lei n ° 92-646 de 13 de Julho de 1992, relativa à eliminação de resíduos, bem como as instalações classificadas para a proteção do meio ambiente, prevê a reciclagem de resíduos inertes.

A Circular de 15 de Fevereiro de 2000, relativa ao planeamento da gestão de resíduos de construção e de obras públicas, no âmbito da implementação dos objetivos da lei de 13 de Julho de 1992, impõe uma obrigação de reciclar e valorizar ao máximo os materiais, resíduos ou subprodutos de todo o setor de atividades de construção e obras públicas. De natureza muito diversa, os resíduos de construção que

podem ser aceitos sobre uma plataforma de estocagem e ser reciclados como materiais de construção são resíduos inertes que, segundo o decreto de 28 de outubro de 2010, são resíduos que não sofrem qualquer mudança física, química ou biológica importante.

Os resíduos inertes não se decompõem, não queimam e não produzem nenhuma outra reação física ou química, não são biodegradáveis e nem afetam negativamente outras substâncias com as quais entrem em contato, de forma susceptível de causar poluição o ambiente ou prejudicar a saúde humana (decreto de 28 de outubro de 2010, França). A Foto 2 mostra o material inerte sobre uma plataforma de estocagem e a Foto 3 mostra uma plataforma de reciclagem de resíduos na França.

Foto 2: Materiais estocados para reciclagem na França.



Fonte: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité, février 2011.

Foto 3: Materiais numa plataforma de reciclagem.



Fonte: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité, février 2011.

Este mesmo decreto, no seu artigo 9, define por meio do anexo I a lista dos materiais que podem ser estocados como materiais inertes sem nenhum estudo de pré-caracterização. A Tabela 4 apresenta um extrato desta lista.

Tabela 4: Extrato da lista de resíduos inertes e condições de obtenção (Referindo-se ao Anexo I do decreto de 28 de Outubro 2010).

Descrição	Restrições
Concreto	Só entulhos de construção e de demolição triados e a exceto de aqueles provenientes de sites contaminados.
Tijolos	Só entulhos de construção e de demolição triados e a exceto de aqueles provenientes de sites contaminados.
Telhas e cerâmicas	Só entulhos de construção e de demolição triados e a exceto de aqueles provenientes de sites contaminados.
Mistos	Só entulhos de construção e de demolição triados e a exceto de aqueles provenientes de sites contaminados.
Vidro	Construção e embalagem
Misturas betuminosas	Após verificação de ausência de betumes
Solos e pedras	A exceto de terra e de turfa; para as pedras e solos provenientes de sites contaminados, só depois de realização de um processo de aceitação prévio.

Fonte: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité, No 22, février 2011.

Em 2009, os principais sindicatos franceses (FNTP, USIRF, Terrassiers de France, Syntec Ingénierie) assinaram com o Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) e a Associação dos Departamentos de França, uma « Convenção de compromisso voluntário dos projetistas de concepção, realização e manutenção de infraestrutura rodoviária, estradas e espaço público urbano"» (IDRRIM, 2011).

Neste acordo, as empresas de construção de estradas e empresas de terraplenagem, especialmente no âmbito da implementação das diretrizes do Grenelle Environnement (Grenelle Ambiente), comprometem-se a preservar os recursos não renováveis e adotando os seguintes objetivos:

- a) A reutilização ou a valorização de 100% dos materiais geológicos naturais escavados em obras de terraplenagem (objetivo declarado: uma melhora de 10% de reutilização em 2012 e 100% de reutilização ou recuperação no horizonte 2020);
- b) Uma melhor valorização de materiais de desconstrução de estradas e um aumento da reciclagem de resíduos de construção de obras públicas;

c) O aumento da reutilização em central de materiais betuminosos de desconstrução de estradas até 60% em 2012 (IDRRIM, 2011).

No seu lado o Estado se comprometeu a:

a) Reforçar a sua política de inovação rodoviária garantindo testes em canteiros de obras, participar da reformulação de doutrina técnica e normativa sobre a reutilização de materiais e reciclagem de resíduos provenientes de desconstrução de estradas, para garantir a promoção desta política com contratadora e o contratado, em particular no âmbito de parcerias técnicas;

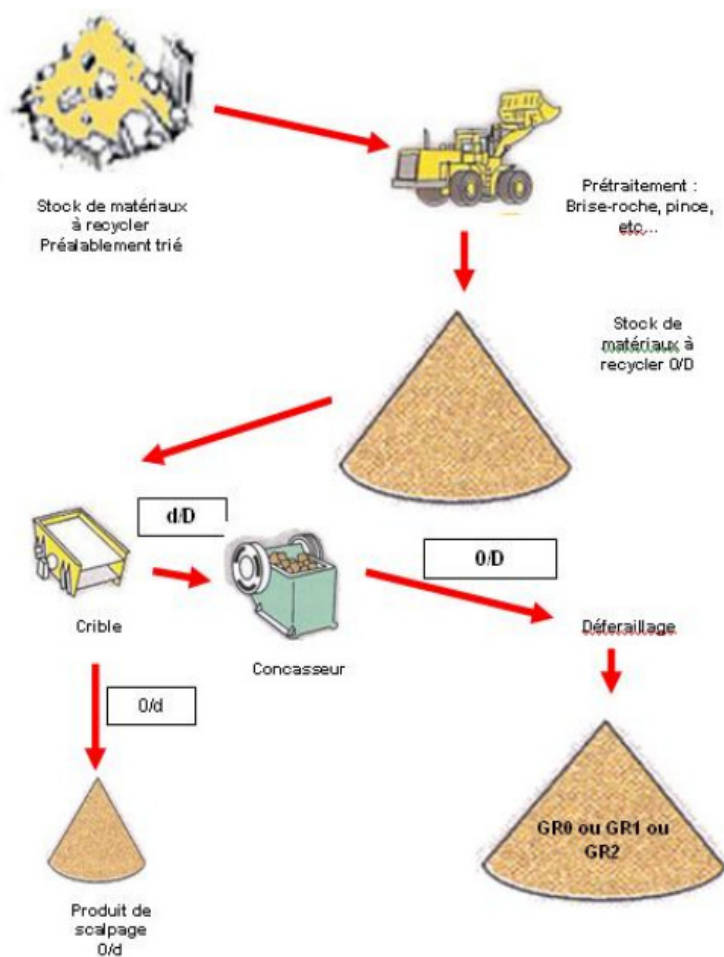
b) Prever sistematicamente, a partir de 2010, em seus mercados de obras a possibilidade de reutilização de materiais, da sua reciclagem ou da valorização dos resíduos, e de abrir os seus mercados de obras aos tais variantes (IDRRIM, 2011).

Na França, dois tipos de instalação podem ser implementadas:

- As instalações fixas localizadas perto de grandes centros de produção, permitir a implementação de equipamentos gigante de reciclagem de britagem e equipamentos complementares de tratamento: lavagem, decantação, triagem manual etc.
- As instalações móveis permitindo de realizar de intervenções pontuais em plataformas de agrupamento ou de canteiros de desconstrução, quando as quantidades a reciclar chegar de 500 a 15.000ton. Esta solução permite minimizar os custos de processamento e desenvolver plataformas de agrupamento de acordo com as necessidades locais, a fim de limitar o transporte de materiais recicláveis.

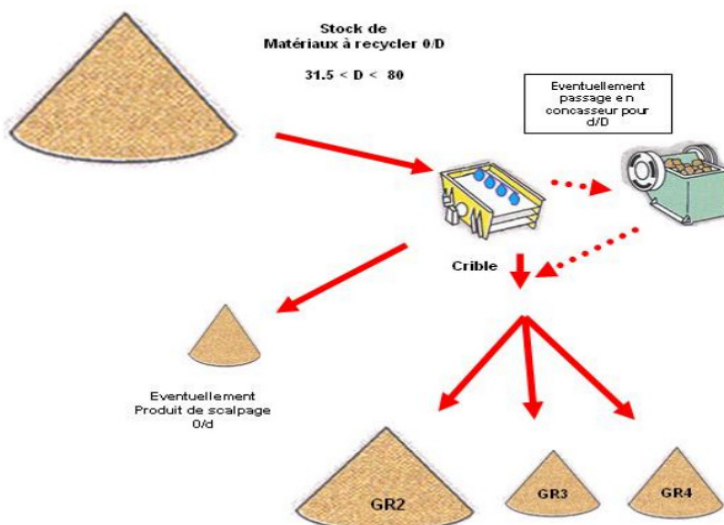
As Figuras 3 e 4 apresentam exemplos indicativos de sinópticos de produção de materiais reciclados nas duas instalações.

Figura 3: Instalação fixa de centro de produção de materiais reciclados em Bourgogne.



Fonte: Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, Federation Bourgogne.

Figura 4: Instalação móvel de centro de produção de materiais reciclados em Bourgogne



Fonte: Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, Federation Bourgogne.

Como visto nas Figuras 3 e 4, na região de Bourgogne são classificados os agregados reciclados, em 5 classes GR0, GR1, GR2, GR3 e GR4 e são caracterizados pelas normas NF P 11-300, NF P 18-545, NF EN 13242, e NF EN 13285. A Tabela 5 apresenta os agregados de cada classe.

Tabela 5: Agregados reciclados produzidos na região de Bourgogne.

Type de GR	Granularité max	Appellation guide
GR 0 M	D max □ 150 mm	GR 0 Mixte 0/150
GR 0 B		GR 0 Béton 0/150
GR 1 M	Dmax □ 80 mm	GR 1 Mixte 0/80
GR 1 B		GR 1 Béton 0/80
GR 2 M	D □ 31,5 mm	GR 2 Mixte 0/31,5
GR 2 B		GR 2 Béton 0/31,5
GR 2 E		GR 2 Enrobés 0/31,5
GR 3 M	D □ 20 mm	GR 3 Mixte 0/20
GR 3 B		GR 3 Béton 0/20
GR 4 M	D □ 20 mm	GR 4 Mixte 0/20
GR 4 B		GR 4 Béton 0/20

Fonte: Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, Federation Bourgogne.

com: M: grave recyclée MIXTE (Agregados reciclados MISTOS) com:

- 40 % de revestimento no máximo para GR0 e GR1 (Rcug 60 da norma NF EN933-11),
- 30 % de revestimento no máximo para GR2, GR3, GR4 (Rcug 70 da norma NF EN933-11).

B: grave recyclée BETON (agregados reciclados de concreto) com o mínimo 90 % de concreto e no máximo 10 % de revestimento (Rcug 90 da norma NF EN933-11).

E: grave recyclée ENROBE (agregados reciclados de revestimento) com no mínimo 80 % de revestimento (Ra80 da norma NF EN933-11).

A Tabela 6 apresenta as características de GR0 e GR1 e o seu emprego como materiais de terraplenagem e camada de reforço de subleito e normas de referências.

Tabela 6: características de GR0 e GR1 e seu emprego como materiais de terraplenagem.

Matérias para aterros e subleito		
Referencia normativa	NF P 11 300	
Categoria de agregado reciclado	GR0	GR1
Parâmetros de produção		
Granulometria NF P 94-056	0/D Dmax ≤ 150 mm	0/D Dmax ≤ 150 mm
Teor de finos		0,080 mm VSS = 12
Limpeza: NF P 94-068		VBS ≤0,2
Características intrínsecas		
Dureza	≤ 45 ≤ 45	
Los Angeles: NF EN 1097-3		
Micro Deval: NF EN 1097-1		
Características físico-químicas		
Teor em sulfatos solúveis na água NF EN 1744-1 art. 10.2	SS1.3(SSc)	SS0,7(SSb)
Identificação de agregados reciclados segundo NF EN 933-11: o ensaio consiste a triar manualmente a amostra e distribuir em constituintes. O resultado é expresso em massa ou volume para às partículas flutuantes.		
X (argilas, metais, gesso)**		X1
FL (partículas flutuantes)	FL5	
Classificação geotécnica e assimilação		
Assimilação GTR após	C1B2 ou C2B2	B2, B3, C1B2 ou C2B2 ou para

análises geotécnicas	subleito D2/D3
Os GR0M e GR1M serão respectivamente compostos no máximo de 40% em peso de revestimento.	
Os GR0B e GR1B serão compostos no mínimo de 90% em peso de concreto.	

Fonte: Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, Federation Bourgogne.

Os materiais de categoria SSc* ($\leq 1,3\%$ sulfatos solúveis) são utilizáveis de acordo com a NFP 11-300, sem qualquer tratamento com cal e ligantes hidráulicos e qualquer contato com materiais tratados com ligantes hidráulicos. Os testes X** e FL** foram selecionados como parte desta guia regional em adição ao teste inicial para garantir um limite mínimo, incluindo o GR0, GR1, garantindo, assim, uma melhor qualidade.

Os materiais de GR2 a GR4 são utilizados como matérias de camadas de base, sub-base de pavimento. A Tabela 7 apresenta características destes tipos de materiais.

Tabela 7: Características de materiais GR2, GR3 e GR4.

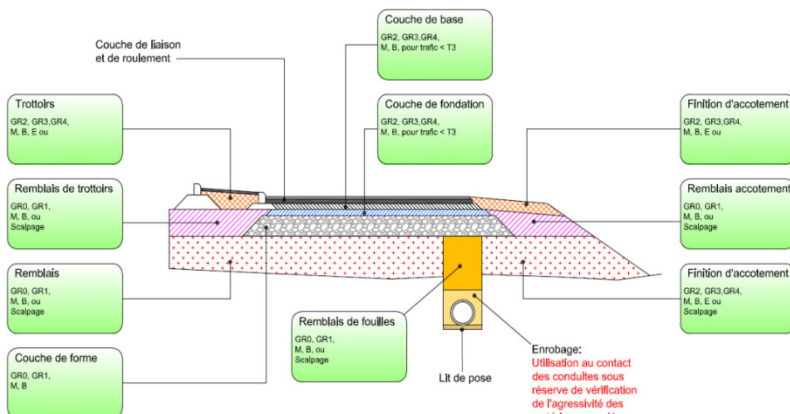
Agregados para base de pavimento			
Referencia normativa	NF EN 13242 / NF EN 13285 / NF P 17545		
Categoria de agregado reciclado	GR2	GR3	GR4
Parâmetros de produção			
Granulometria NF P 94-056	0/31,5	0/20	0/20
Classificação segundo NF P 18545	Código c GF80 GTF10	Código b GF85 GTF10	Código b GF85 GTF10
Teor de finos	0,083 mm Mini = 2 Maxi = 12	0,063 mm Mini = 2 Maxi = 12	0,063 mm Mini = 2 Maxi = 12
Limpeza: NF P 94-068	Código c MB ≤ 3 (ou MB 0/D ≤ 1) (ou SE ≥ 40)	Código c MB $\leq 2,5$ (ou MB 0/D $\leq 0,8$) (ou SE ≥ 50)	Código c MB $\leq 2,5$ (ou MB 0/D $\leq 0,8$) (ou SE ≥ 50)
Características intrínsecas			
Dureza LA: NF EN 1097-2 MDE: NF EN 1097-1	LA ≤ 45 MDE ≤ 45 LA+MDE ≤ 80	LA ≤ 40 MDE ≤ 35 LA+MDE ≤ 65	LA ≤ 40 MDE ≤ 35 LA+MDE ≤ 65
Características físico-químicas			
Teor em sulfatos solúveis na água NF EN 1744-1 art. 10.2	SS0,7(SSb)	SS0,7(SSb)	SS0,7(SSb)
Identificação de agregados reciclados segundo NF EN 933-11: o ensaio consiste a triar manualmente a amostra e distribuir em constituintes. O resultado é expresso em massa ou volume para às partículas flutuantes.			

RC (concreto)	Os GR mistos (GR2M, GR3M, GR4M).
Ru (GNT e MTLH)	Os GR de revestimento (GR2E): Rcug70.
Rg (vidro)	Os GR de concreto (GR2B, GR3B, GR4B): Rcug90.
X (argilas, metais, gesso)	X1
FL (partículas flutuantes)	FL5
Os ensaios LA E MDE não são adaptados aos agregados reciclados de revestimentos GRE.	
Os revestimentos serão em prioridade para uma indústria de reciclagem para incorporação na produção de materiais betuminosos viários.	

Fonte: Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, Federation Bourgogne.

A aplicação desses materiais na pavimentação é apresentada de forma detalhada na Figura 5.

Figura 5: Domínio de aplicação de cada material



Fonte: Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, Federation Bourgogne.

A utilização de materiais de GR2 é reservada às camadas de pequena espessura, de 10 cm o máximo (camada de base de calçamento, estacionamento de VL (Veículos Pesados) ou rua com pequeno tráfego).

Seu uso em outras condições deve ser submetido à validação na forma de uma placa de referência para a definição das modalidades de implementação, controle e as características obtidas *in situ*.

Deve também notar-se que o melhor uso da GR2 E é a reciclagem com cal na produção de novo revestimento, quando as ferramentas industriais o permitem.

É importante relatar que o Instituto das Estradas, das Ruas e das Infraestruturas para a Mobilidade (IDRRIM) e a Federação Bourgoigne apresentam no seu guia Técnico para a Utilização de Materiais Alternativos de Bourgoigne, particularmente os agregados reciclados provenientes da demolição de edifícios e de obras pública, algumas precauções necessários no emprego desses materiais tais como compactação e teor de umidade, agressividade à obra e o meio ambiente. A Tabela 8 apresenta os agregados reciclados, domínio e precauções de emprego.

Tabela 8: Domínio e precauções de emprego.

Produtos	Classificação	Domínio e precaução de emprego.
GR0M	C1B2 ou C2B2	Uso: aterros gerais, aterros de escavações, subleitos.
GR0B	C1B2 ou C2B2	Uso: aterros gerais, aterros de escavações, subleitos.
GR1M	D31 ou C2B3	Uso: aterros gerais, aterros de escavações, subleitos. Precaução de emprego: -Domínio de teor de água -Verificação de agressividade dos materiais se necessário.
GR1B	D31 ou C2B3	Uso: aterros gerais, aterros de escavações, subleitos. Precaução de emprego: -Domínio de teor de água -Verificação de agressividade dos materiais se necessário.
GR2M GR3M GR4M	GNT 2, 3, 4	Uso: camada de sub-base ou base para tráfego < T3, subleito, calçadas, acostamento Precaução de emprego: -Domínio de teor de água.
GR2B GR3B GR4B	GNT 2, 3, 4	Uso: camada de sub-base ou base para tráfego < T3, subleito, calçadas, acostamento Precaução de emprego: -Domínio de teor de água -Verificação de agressividade dos materiais se necessário.
GR2E		Uso: camada de revestimento de pavimento de pedestres e de tráfego inferior a T4. Precaução de emprego: -o uso dever ser limitado a camadas de baixa espessura (10 cm).
Escalpamento		Uso: aterros gerais, aterros de escavações. Precaução de emprego: -Domínio de teor de água

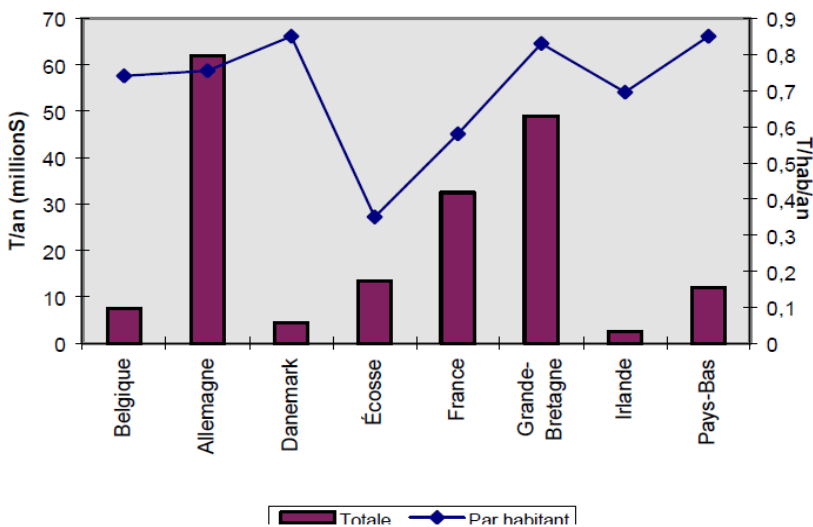
Fonte: IDRRIM, Anexo 2, 2011; Federação Bourgogne, 2012.

2.2.4 Caso da União Europeia

Em 1990, a EU, sem a França, produziu cerca de 175 milhões de toneladas de matéria seca por ano para 350 milhões de habitantes. Isso representa uma média de 500 kg de resíduos por habitante por ano (0,5 toneladas / habitante). Para todos os países europeus, a produção de resíduos de construção e demolição varia de 62 milhões de toneladas na Alemanha e 4 milhões de toneladas para Irlanda (VANDERHAEGEN, 1998).

A Figura 6 mostra a produção de resíduos de construção e de demolição em Europa.

Figura 6: Produção anual de resíduos de construção e de demolição na Europa.



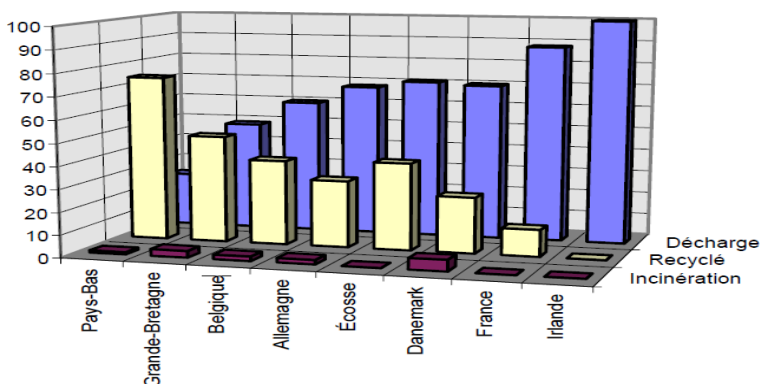
Fonte: CSTC, 1993.

Esses números, porém, não são infalíveis, desde a quantidade de materiais secos gerados para cada país é estimado através da definição específica dos materiais secos próprio a cada um. A forma de gestão desses resíduos é aterro, incineração ou reciclagem. A maioria dos resíduos pode ser encontrada em qualquer uma descarga, enquanto uma

pequena quantidade é incinerada e o resto reutilizado ou reciclado (CSTC, 1993).

É apresentada na Figura 7 a destinação de resíduos de construção e demolição na Europa.

Figura 7: Destinação de resíduos de construção e demolição na Europa.



Fonte: CSTC, 1993.

2.2.5 Caso de USA

De acordo com um relatório publicado em 1986 pela *Environmental Protection Agency, Characterization of Municipal Solid Waste in the United States, 1960 to 2000*, os resíduos de construção e demolição representavam 24% de todos os resíduos sólidos despejados em aterros ou 31,5 milhões de toneladas por ano.

No entanto, na conferência nacional em matéria de resíduos, em 1992, a quantidade de resíduo foi avaliada em 110 milhões de toneladas, valor muito mais plausível, porque, de acordo com um estudo de 1998, 136 milhões de toneladas de resíduos são produzidos anualmente (ver Tabela 9), (*Characterization of Municipal Solid Waste in the United States, 1960 to 2000*, prepared for the U.S. Environmental Protection Agency by Franklin Associates Ltd., juillet 1986 e Recyc-Quebec).

Tabela 9: Quantidades estimadas de resíduos nos USA em milhares de toneladas.

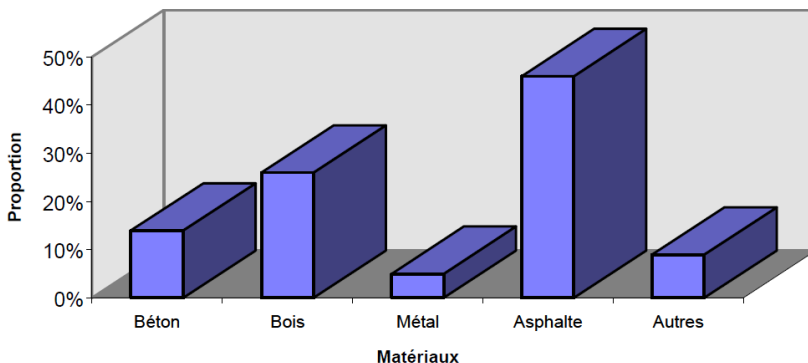
Origem	Residencial		Não residencial		Total	
	000 tm	%	000 tm	%	000 tm	%
Construção	6 560	11	4 270	6	10 830	8
Renovação	31 900	55	28 000	36	59 900	44
Demolição	19 700	34	45 100	58	64 800	48
Total	58 160	100	77 370	100	135 530	100
Porcentagem	43		57		100	

Fonte: Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States, 1996.

Nos últimos anos, a taxa de geração de entulho de construção e demolição foi estimada entre 0,05 e 1,60 kg/capita por dia. Essa diferença reflete a variabilidade e as taxas de incerteza gerada. Para eliminar estes resíduos 1900 aterros de resíduos de construção e demolição ainda estavam em funcionamento em 1998, além de 5600 aterros municipais (*Charactérization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States, prepared for the U.S., Environmental Protection Agency by Franklin Associates, Ltd., June 1998*). No geral, cada aterro recebe cerca de 30 mil toneladas de material, tonelagem, multiplicada pelo número de materiais secos disponíveis, dando um total de 50 milhões de toneladas de materiais enterrados em lugares dedicados a estes materiais. Isto significa que um pouco menos de 100 milhões de toneladas são enterrados ou em aterros ou em depósitos não permitidos (pesquisa de Recyc-Quebec, Canada).

É difícil determinar as quantidades reais de resíduos recuperados nos Estados Unidos. No entanto, um estudo sobre o estado de Vermont, publicado em 1990, afirma que cerca de 50% dos resíduos de construção e demolição são recuperados. Em Portland, Oregon, essa taxa chegou a 45% em 1993 em Boston, Massachusetts, cerca de 60% em 1997. De acordo com o estudo de Vermont, as obras rodoviárias são responsáveis por cerca de 70% das quantidades de resíduos gerados, contra 30% de tudo que vem de construções. Em ordem de importância, incluem asfalto, madeira, concreto, metal e materiais mistos (vidro, plástico, papelão, etc.). A Figura 8 mostra a composição dos resíduos de construção e demolição em Vermont (em peso).

Figura 8: Composição dos resíduos de construção e demolição em Vermont (em peso).



Fonte: USEPA, 1995 e Recyc-Quebec.

Em relação à construção de estradas os Estados Unidos reutilizam, a cada ano cerca de 50 milhões de toneladas de asfalto sendo 20 a 50% como concreto asfáltico reciclado. No estado de Washington, 650.000 a 1.000.000 toneladas são recicladas por ano, enquanto na Califórnia, para 8,2 milhões de toneladas de diversos resíduos de estrada, 57% são reciclados (Recyc-Quebec, Canada).

Em 1990, para tratar estes materiais, o território dos EUA enumeravam 1800 unidades de reciclagem, sendo 1000 unidades de reciclagem de asfalto e concreto, 500 unidades de reciclagem de madeira e 300 outras unidades que são usados para tratar resíduos de construção mista. Em 1997, o número de 1.800 unidades de reciclagem passa a cerca de 3500 unidades de reciclagem (Recyc-Quebec, Canada).

2.2.6 Caso de Canada

Nos anos de 1980, o Canadá gerava cerca de 15 milhões de toneladas por ano de materiais secos. Em 1992, esse valor diminuiu para pouco mais de 11 milhões de toneladas. São os resíduos de construção e reparação de estradas e pontes que chegam com maior proporção com 55-63% da geração total de materiais secos. Em menor proporção, o valor gerado pela construção, renovação e demolição de edifícios é de 37 a 45% (Recyc-Quebec, Canada).

Os métodos de gestão de resíduos praticados no Canadá são principalmente aterros em um local previsto para este fim: a incineração ou reciclagem. Algumas regiões já têm recorrido à imersão no mar ou em lagos (Ontário e British Columbia). Em média, 43% dos resíduos de construção e demolição são desviados dos aterros. A área de estradas e pontes continua a ser o maior gerador de resíduos com 40,3% de recuperação dos materiais principalmente de asfalto e concreto (Recyc-Quebec, Canada).

Em 1998, o Governo de Quebec tornou público o plano de ação de Quebec sobre a gestão de resíduos. O objetivo fixado pelo governo deveria conduzir os habitantes a uma redução de 65% dos resíduos destinados ao aterro sanitário a cada ano. Esse objetivo os permitia alcançar, até 2008, a valorização de 4,793 milhões de toneladas de resíduos cujos 1,4 milhões de toneladas vieram de construção, renovação e demolição (Recyc-Quebec, Canada).

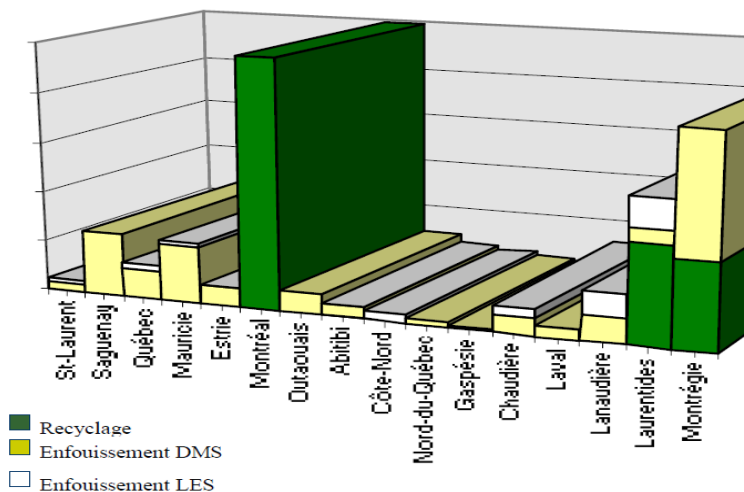
Os materiais recuperados são enviados para os locais de armazenamento ou triagem em massa. Uma vez separado, são submetidos a várias etapas de condicionamento: trituração mecânica, trituração de madeira, moagem de concreto, peneiramento e isso, dependendo do tipo de matéria (Recyc-Quebec, Canada).

De fato, em 1994, Quebec tinha 109 aterros de resíduos. Em 2008, pouco mais de 73 depósitos estavam em operação. Assim, pode-se perceber um aumento nos preços de materiais reciclados e, conseqüentemente, o aumento das atividades de reciclagem devido às condições econômicas de oferta e demanda.

Naquele ano, na região de Montreal e em partes de Quebec, já se podia observar muitas empresas criando unidades de reciclagem de entulho de construção e demolição (Recyclage Madeco Inc., Sintra Inc., les Éco-centres Petite-Patrie e l'Acadie, Copeaux de bois Secure), bem como diversas associações que procuram promover o potencial de resíduos na indústria de reciclagem. Vários municípios de Quebec, bem como o Ministério dos Transportes do Quebec, também estão envolvidos na promoção do potencial dos resíduos, ou por encontrar novas aplicações ou simplesmente reutilizar esses resíduos na construção ou reparação de estradas.

A Figura 9 mostra uma visão detalhada sobre o nível de reciclagem de resíduos em Quebec em 1998.

Figura 9: Visão detalhada sobre o nível de reciclagem de resíduos em Quebec



Fonte: Recyc-Quebec

2.2.7 Aplicação no Brasil

No Brasil, estão sendo desenvolvidos vários programas de reciclagem de resíduos sólidos, seja no nível municipal, estadual e federal tentando resolver o problema de gestão de resíduos sólidos de construção civil pela reciclagem. Desde 1991, com a inauguração da primeira usina de reciclagem em Itainga, localizada na zona sul de São Paulo, os municípios vem construindo outras unidades de instalações de reciclagem, como as da Londrina no Paraná e as de Belo Horizonte em Minas Gerais (ZORDAN, 1997; SANTOS, 2007). Em novembro de 1995 foi inaugurada a usina de reciclagem de Belo Horizonte no bairro Estoril (CHENNA, 2001).

Em Recife, existem varias propostas de utilização de materiais recicláveis como, por exemplo, o estudo da interação solo-concreto convencional com agregado reciclado em obras de contenção (Feira *et al.*, 2006) e um outro que avaliou a resistência à compressão de concreto com o agregado reciclado, onde foi observado através de ensaios um menor resistência a compressão e um maior consumo de cimento acarretando um maior custo de produção de concreto (OLIVEIRA, 2007).

Segundo Silva *et al.* (2008), o uso de RCD como agregado miúdo em obras de melhoramento apresenta grande potencial de uso em

estacas de compactação de areia e brita. Além de contribuir para a preservação do meio ambiente, tal uso tende a provocar uma redução nos custos de melhoramento de solo.

A reutilização desses resíduos trará grande benefício para o meio ambiente e contribuirá para resolver alguns dos problemas urbanos que é a destinação final de RCD (SILVA e al., 2008).

Trabalhos científicos já realizados no Brasil e no exterior, revelam que o uso do RCD em camadas de pavimentos é uma possível solução a ser adotada visando à mitigação dos impactos ambientais gerados pelo manejo inadequado destes resíduos. Pesquisas sobre a utilização deste material em pavimentação vêm sendo desenvolvidas no Brasil desde a segunda metade da década de 1990. Motta *et al.* (2004) realizaram um estudo sobre a viabilidade técnica do uso de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de pavimentos, para vias de baixo volume de tráfego. Os valores de CBR para reforço do subleito, sub-base e base obtidos, bem como os resultados de ensaios de módulo de resiliência realizados foram considerados satisfatórios, tanto para sub-bases como para bases.

Silva *et al* (2008) verificaram a aplicação de dois tipos de RCD e um solo para emprego em camadas granulares na cidade de Fortaleza. As propriedades investigadas (MR e CBR) permitiram sugerir que a mistura fosse empregada em camadas granulares de pavimento.

Em geral o emprego de RCD em revestimentos se depara ainda com algumas dificuldades, como a elevada porosidade dos agregados reciclados. Tal característica eleva o consumo do ligante asfáltico e, conseqüentemente, o custo dos pavimentos (DIAS E GRECO, 2009).

Com a finalidade de estimular e regulamentar o emprego do agregado reciclado foi criada em 2002 a Resolução do CONAMA nº 307, que determina diretrizes para a gestão dos RCD, e em 2003 a NBR 15115, que especifica a utilização do agregado reciclado na pavimentação (LEITE *et al.*, 2006).

O uso dos agregados reciclados de RCD em pavimentação é técnica e economicamente motivador, ambientalmente benéfico e, além disso, uma resposta à necessidade de crescimento sustentável não apenas de um município, mas de um país, caracterizando a adoção da filosofia da racionalidade, da filosofia da preservação (FERNANDES, 2004). A reciclagem destes resíduos para emprego em camadas de pavimentos proporciona uma série de vantagens, como a preservação das jazidas naturais e a redução nos custos das obras (RON *et al.*, 2008).

Aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil em camadas de reforço do subleito, sub-base e base de

pavimentos flexíveis tem sido constatada. Essa solução vem sendo posta em prática com resultados positivos em diversas cidades, destacando-se a cidade de Belo Horizonte. Com o intuito de ampliar o emprego de RCD em pavimentos, pesquisas estão sendo desenvolvidas acerca da adequação da utilização desse agregado reciclado em revestimentos asfálticos (DIAS E GRECO, 2009).

Na Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo, um trabalho de pesquisa sobre este assunto foi realizado sobre a utilização destes resíduos na pavimentação. A amostra estudada em laboratório foi coletada na usina recicladora da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP).

Para caracterizar fisicamente o material, foram feitos quatro ensaios: (a) separação dos componentes em função de sua natureza; (b) verificação da distribuição granulométrica; (c) abrasão *Los Angeles*; e (d) absorção. Já o estudo do comportamento mecânico do agregado reciclado incluiu os seguintes ensaios: (a) compactação utilizando o equipamento MCV adaptado; (b) Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.); e (c) módulo de resiliência (M.R.).

Segundo Motta *et al.*, 2005, o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil é de uso promissor em obras de pavimentação por apresentar expansão nula e Índice de Suporte Califórnia de valor aceitável – 75% – para vias com volume de tráfego $N \leq 10^6$ de repetições do eixo-padrão de 80 kN. De acordo com a NBR 15115, os valores mínimos de C.B.R. para reforço do subleito, sub-base e base são, respectivamente, 12, 20 e 60%.

Em relação ao módulo de resiliência, tomando como referência os valores mínimos empregados pela PMSP, o material também apresenta valor satisfatório – em torno de 120 MPa – tanto para bases como para sub-bases. As bases granulares devem apresentar M.R. entre 100 e 500 MPa e as sub-bases, levando-se em conta um C.B.R. do subleito de valor baixo e igual a 2%, devem ser acima de 120 MPa, aproximadamente (USP, São Paulo).

O uso do agregado reciclado deve ser incentivado, tanto por apresentar custo inferior aos materiais comumente empregados, como para reduzir problemas ambientais causados pelo grande volume gerado.

2.3 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RCD

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na sua resolução 307 de 2002 definiu os resíduos da construção civil como: os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, ferros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras.

O código ambiental francês no seu art. 1541-1-1 definiu os resíduos como: qualquer substância ou objeto, ou geralmente, qualquer objeto que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer (Código Ambiental da França, versão de 12 de julho de 2014).

Além disso, esta Resolução trata em seu texto de classificar os vários tipos de resíduos da construção civil além de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Os entulhos, sendo assim, deverão ser classificados em quatro tipos:

- **Classe A:** são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- **Classe B:** são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
- **Classe C:** são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

- **Classe D:** são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (CONAMA, 2002).

Essa classificação baseia-se na presença de certas substâncias perigosas, relacionadas na norma, e em testes laboratoriais complementares, nos quais vários parâmetros químicos são analisados nos extratos lixiviados e solubilizados dos resíduos. Apesar de a NBR 10.004 ser baseada em procedimentos americanos, relacionados no *Code of Federal Registry – Title 40 (CFR 40) – Protection of Environment* (USA, 1994), a classificação dos resíduos sólidos em três classes é peculiar à norma brasileira, pois o CFR 40, USA, orienta para a classificação dos resíduos apenas em perigosos e não-perigosos, sem mencionar o teste de solubilização dos resíduos, que é o principal responsável pela classificação dos resíduos não-inertes e inertes segundo a norma brasileira.

Segundo o código ambiental da França, os resíduos de construções são classificados em 4 grupos seguintes:

- **Resíduos inertes:** Tais como concreto, pedra, tijolo, bloco de concreto, etc. Eles representam a maior, cerca de 60% para construção, 85% para a demolição, de depósito.
- **Resíduos industriais não perigosos (DIB):** Estes são assimilados resíduos no lixo, como papel, papelão, plástico, metal, etc. Representam cerca de 20 a 30% da massa de resíduos num local.
- **Resíduos de embalagens:** Sua quantidade de um projeto varia entre 1 e 3%. Os resíduos de embalagens (ou o fornecimento de resíduos), tais como paletes, filme plástico, etc. Devem ser valorizados (Decreto de 13/07/1994).
- **Resíduos perigosos:** Estes são os resíduos de tintas, colas, madeira tratada, amianto, etc. Eles são classificados como perigosos pela sua toxicidade ou perigosidade. Seu depósito é de cerca de 2% da massa total dos resíduos produzidos no local. No entanto, o custo da eliminação dos resíduos nesta categoria

é de cerca de quinze a vinte vezes maior do que a de resíduos inertes. O regulamento deste tipo de resíduos também é muito apertado. Esta categoria de resíduos, apesar de sua baixa percentagem, não é insignificante.

3. PAVIMENTOS

Pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, a:

- Receber as cargas impostas pelo tráfego de veículos e as redistribuir para os solos da fundação (subleito);
- Proporcionar condições satisfatórias de velocidade, segurança, conforto e economia no transporte de pessoas e mercadorias (GRECO, 2004).

Superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentados sobre um semi-espço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito (Manual do DNIT, 2006).

3.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

De acordo com a forma de distribuição de tensões, os pavimentos são classificados em: Pavimentos rígido, semirrígido e Flexível. Os pavimentos tipo flexível e semirrígido é aquele de interesse neste trabalho.

3.1.1 Pavimento flexível

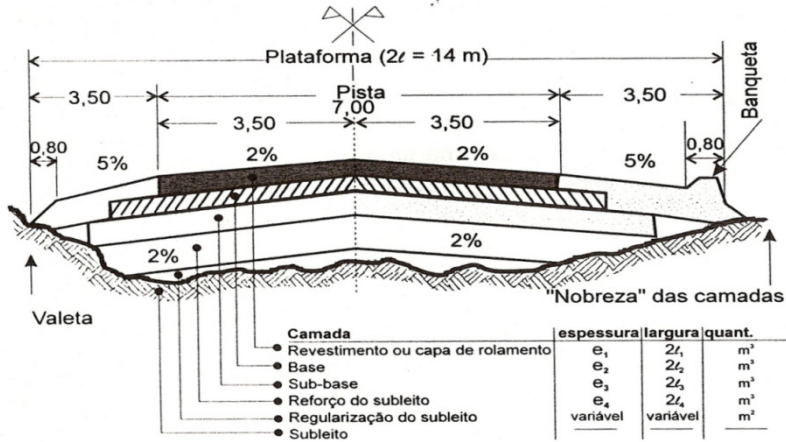
É aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (Manual do DNIT, 2006). A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas sobrepostas, onde as de melhor qualidade estão posicionadas mais próximas da carga aplicada.

No caso de pavimento flexível suas camadas têm uma relação complexa na qual a função de cada camada é interligada com as outras garantindo a uniformidade do comportamento do pavimento. Essas camadas, de acordo com a Figura 10 são: subleito, regularização de subleito, reforço de subleito, sub-base; base e revestimento. Em alguns casos algumas são desnecessárias e considera unicamente três camadas: sub-base; base e revestimento. Essas camadas repousam sobre o subleito, que é a plataforma da estrada. Compreende a infraestrutura implantada, bem acabada em termos de movimento de terra (limpeza,

cortes e aterros) e de seu aspecto superficial. O subleito é o terreno de fundação do pavimento.

A Figura 10 mostra a seção transversal de um pavimento flexível.

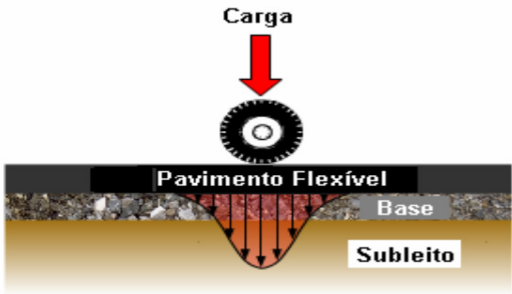
Figura 80: Seção transversal de um pavimento flexível.



Fonte: Senço, 1997.

No pavimento flexível, o revestimento funciona como camada de rolamento e é quem absorve os esforços devido ao tráfego transfere para as demais camadas até a fundação (Figura 11).

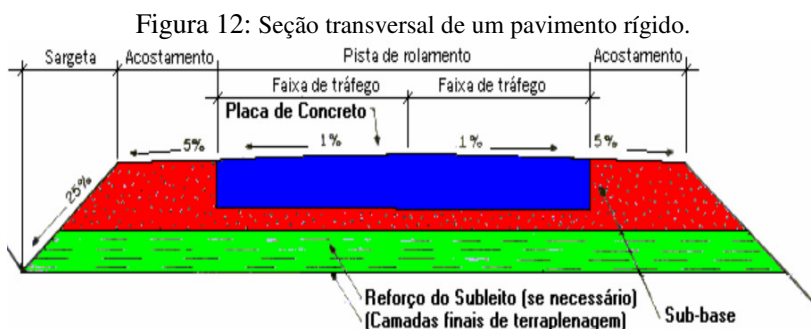
Figura 11: Distribuição de carga nos pavimentos flexíveis.



3.1.2 Pavimento Rígido

É aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (Manual do DNIT, 2006).

O pavimento rígido é constituído de placa de concreto de cimento Portland (Figura 12). A camada desempenha o papel de revestimento e base ao mesmo tempo. A sub-base é empregada com o objetivo de propiciar um assentamento uniforme da placa e melhorar a capacidade de suporte do subleito.



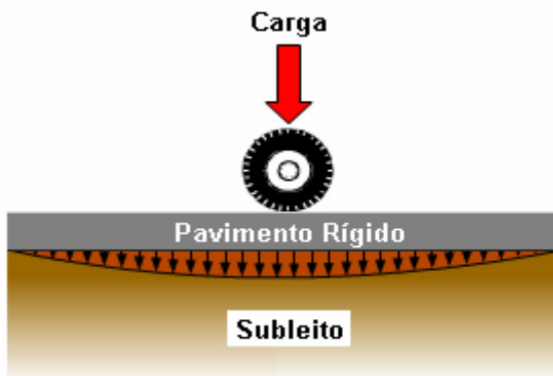
Fonte: Pavimentação, Geraldo Luciano de Oliveira Marques, UFJF.

Por causa da alta rigidez do concreto, a placa distribui o carregamento para uma grande área de solo. A maior parte da capacidade estrutural é provida pela própria placa, ao contrário de pavimentos flexíveis onde a capacidade estrutural é atingida através de camadas de sub-base, base e revestimento (Figura 13).

Devido à importância da placa de concreto no pavimento rígido, a resistência do concreto é o fator mais importante no projeto, principalmente a resistência à tração na flexão.

Pequenas variações na sub-base ou subleito têm pouca influência na capacidade estrutural do pavimento. A sub-base pode ser flexível, estabilizada granulometricamente, ou semirrígidas estabilizadas com cimento Portland, cal ou betume e servem para controlar a erosão de material granular sub-base através das juntas, controlar expansão e contração do subleito, drenagem e acelerar a construção.

Figura 13: Distribuição de carga nos pavimentos rígidos.



Nos pavimentos rígidos, a espessura da placa está diretamente ligada às tensões de tração na flexão produzidas pelas cargas solicitantes e à relação entre aquelas e a resistência do concreto à tração na flexão. A medida da resistência à tração na flexão do concreto é feita pela determinação do módulo de ruptura (MOR) de corpos prismáticos.

3.1.3 Pavimento semirrígido

Este tipo de pavimento é definido como sendo aquele em que a base da estrutura é executada com adição de cimento. Devido ao aumento de rigidez, e consequentemente módulo de elasticidade, ela absorve parte dos esforços de tração. É uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É o caso das misturas solo-cimento, solo-cal, solo-betume dentre outras, que apresentam razoável resistência à tração.

Na Figura 14 apresenta-se um desenho esquemático de um corpo de prova extraído de um pavimento semirrígido por sondagem a rotação (revestimento mais base e sub-base).

Figura 14: Materiais tratados com ligantes de um pavimento semirrígido.



Fonte: Diretivas para concepção de pavimentos, critérios de dimensionamento, Instituto de Infraestruturas rodoviárias, INIR, SP).

3.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Dimensionar um pavimento consiste em calcular a espessura do mesmo em função da carga solicitante ao qual será projetado correlacionado à carga permissível ao subleito sem acarretar ao mesmo, grandes deformações ou alterações danosas. Lembrando que o pavimento possui camadas que podem ser constituídas de diversos materiais, o dimensionamento traduz-se no cálculo da espessura de cada camada, delimitando os possíveis elementos utilizáveis na estrutura levando em consideração suas características físico-químicas.

O dimensionamento de um pavimento, particularmente no Brasil, pode ser feito de três maneiras diferentes, descritas a seguir.

3.2.1 Método para Dimensionamento de Pavimento Flexível DNER/81.

A metodologia DNER/81 é baseada no trabalho de TURNBULL, FOSTER E AHLVIN: "Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume", do corpo de engenheiros norte americano, concluído através de dados experimentais da pista da AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.

Consiste em dimensionar a estrutura a qual irá proteger o subleito, sendo este qualificado através da sua Capacidade de Suporte - CBR, não podendo ser inferior a 2% e não ter expansibilidade maior que 2%.

A estrutura é dividida em: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, sendo que cada uma dessas camadas é suportada pela anterior e dá suporte a posterior.

Os materiais empregados na estrutura têm certas restrições, tais como: no reforço de subleito terá que ter CBR maior que a camada anterior e apresentar expansão menor que 1%; na sub-base o CBR maior que 20% e a expansão menor que 1%; na base CBR maior que 80% e expansão menor que 0,5%, Limite de liquidez $\leq 25\%$ e Índice de Plasticidade $\leq 6\%$.

O método do DNER não distingue o fator climático regional, sendo adotado 1 para todo o Brasil, sendo isso uma falha do método devido à grande extensão territorial e diferentes tipos de climas e regimes pluviométricos no país.

Através de estudo de distribuição de tensão na estrutura do pavimento concluiu-se que a distribuição de tensões não é de forma homogênea em diferentes materiais. Com isso tomou-se como referência o material granular, o qual se atribuiu fator 1, e os demais materiais possuem fator variando de 1 a 2.

O método também define a espessura mínima de revestimento betuminoso (R), variando de tratamento superficial até 12,5 cm de CBUQ, conforme valor de N na Tabela 10.

Tabela 10: Camada mínima de revestimento betuminoso.

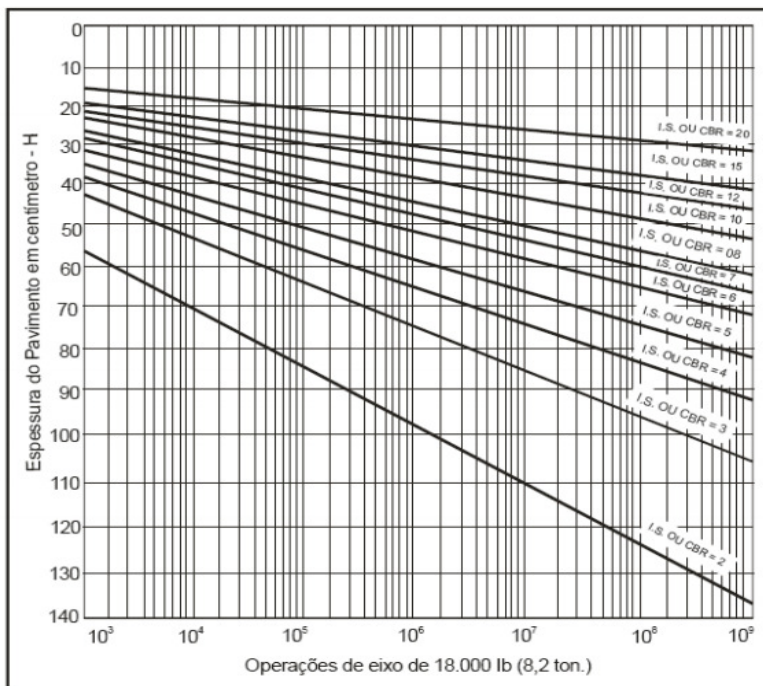
N repetições de 8,2 tf	Tipo do Revestimento	Espessura de revestimento betuminoso (mm)
$\leq 10^6$	Tratamentos Superficiais	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos Betuminosos CA, PMQ, PMF	50
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto Betuminoso	75
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto Betuminoso	100
$N \geq 5 \times 10^7$	Concreto Betuminoso	125

Fonte: Manual de DNIT 2006.

Para o dimensionamento das camadas granulares o método dispõe o gráfico da Figura 15 no qual, em função do número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período do projeto, Índice de Suporte de Califórnia CBR e em termos de $K = 1,0$, tira-se a

espessura total do pavimento H_{20} como se o CBR fosse 20% mesmo que seja superior.

Figura 15: Determinação de espessura de pavimento.



Fonte: Manual do Pavimento de DNIT.

Uma vez determinadas, a través da Figura 15, as camadas H_m , H_{20} e H_n , as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são calculadas pelas inequações a seguir:

$$R.KR + B.KB \geq H_{20}$$

$$R.KR + B.KB + h_{20}.KS \geq H_n$$

$$R.KR + B.KB + h_{20}.KS + h_n.Kref \geq H$$

onde os valores de K, é o coeficiente de equivalência estrutural que depende do tipo do material, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Coeficiente de equivalência estrutural de materiais.

Coeficiente de Equivalência Estrutural dos Materiais	
Tipo de Material	Coeficiente Estrutural (k)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Base Granulares	1,0
Sub-base granulares	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior a 4,5MPa (compressão)	1,7
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,8 a 4,5MPa (compressão)	1,4
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,1 a 4,5MPa (compressão)	1,2
Bases de solo-cal	1,2

Fonte: Manual do pavimento de DNIT (2006).

3.2.2 Método TECNAPAV/94.

Este método foi desenvolvido no Brasil e leva em conta a resiliência do subleito e dos materiais terrosos e granulares que compõem a estrutura. O procedimento de cálculo contempla os esforços mais importantes no qual a estrutura do pavimento é solicitada: deflexão na superfície, deformação de tração na parte inferior do revestimento, tensões e deformações verticais no subleito.

O primeiro passo é classificar o solo quanto a sua resiliência do subleito e do reforço do subleito. Na sequência, se determina a espessura total da estrutura do pavimento através da fórmula:

$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598} \quad (1)$$

onde: N - Número de solicitações equivalentes ao eixo de 8,2 ton (USACE);

CBR - Índice de Suporte Califórnia.

A espessura mínima do revestimento betuminoso é calculada através da seguinte equação:

$$H_{cb} = -5,737 + 807,961/D_p + 0,9721I_1 + 4,101 I_2 \quad (2)$$

onde: D_p - Deflexão de projeto;

I_1 e I_2 - Constantes que dependem da classificação resiliente do solo de fundação.

Para camadas granulares esse método usa fator estrutura de distribuição de tensões 1, já o revestimento possui valor variável dependendo da classe de resiliência e do N8,2tf.

Por último, calcula-se a espessura de cada camada da estrutura, sendo a espessura mínima para Hcg (espessura da camada granular) $\leq 35\text{cm}$, isso levando em conta o fato de camadas granulares terem baixo módulo de resiliência e baixa tensão confinante.

3.2.3 Método para Dimensionamento de Pavimento Rígido PCA/84

Este método de dimensionamento de estrutura de pavimento rígido foi desenvolvido pela Portland Cement Association (PCA) dos EUA e agrega progressos e conhecimentos obtidos nos três últimos decênios nas áreas de cálculos de tensões, projetos geométricos, construção e gerência desse tipo de pavimento e foi publicado pela primeira vez em 1984.

O método difere profundamente do editado em 1966, fundado exclusivamente no modelo de fadiga do concreto. Além disso, o método PCA/84 aplica-se tanto a pavimento de concreto simples e com barras de transferência, quanto aos dotados de armadura distribuída, descontínua ou contínua, e usa um modelo de análise estrutural por elementos finitos. O sistema permite combinar facilmente diferentes fatores de projeto, propiciando a análise acelerada de muitas soluções alternativas.

Ele baseia-se no princípio de placas totalmente apoiadas no solo, sendo que isso irá gerar forças de compressão e um momento, e este gerará forças normais de tração e compressão, que serão resistidas pelo concreto.

Através do ensaio de fadiga em vigota é possível estimar e considerar no método a relação das tensões (tensão aplicada/resistência do concreto) com o número de solicitações resistidas e então chegar a conclusão que quando essa relação é inferior a 0,4 o concreto não rompe por fadiga.

O método também leva em conta a possibilidade de ruína da placa por erosão do material da sub-base (diminui o coeficiente de reação do sistema).

O método é aplicável no dimensionamento de:

- Pavimentos de concreto simples, nos quais não há nenhuma espécie de aço, sob nenhuma forma, e têm a entrosagem de agregados como única maneira de transferência de carga entre

placas. Essas placas podem ter, no Brasil, de 4,5 m a 6,0 m de comprimento;

- Pavimentos de concreto simples com barras de transferência, dotados de sistemas artificiais de transferência de cargas formados por barras curtas de aço liso, postadas na meia-seção das juntas transversais, e que podem ter comprimentos de placa de até 9,0 m;
- Pavimentos de concreto com armaduras distribuídas descontínuas, que se detém antes de cada junta transversal e não tem função estrutural, ou seja, não contribui para aumentar a resistência da placa à flexão, sendo sua exclusiva função a de manter fortemente ligadas as fissuras que acaso se formem entre duas juntas transversais seguidas, dado que, nesse tipo de pavimento as placas são de grande comprimento, até 30,0 m, embora as de 12,0 m sejam mais comuns; é obrigatória a adoção de barras de transferência;
- Pavimentos de concreto com armaduras distribuídas contínuas, nos quais não há juntas transversais de retração e a armadura, bastante pesada, faz com que se tenha boa transmissão de carga nas fissuras; o comprimento das placas é igual à extensão diária construída. Não há exemplos de utilização dessa forma de pavimentos de concreto no Brasil (Bruno Almeida Cunha de Castro).

Este método poderia ser mais praticado no Brasil, pois no país há a preferência por pavimentos flexíveis por não ser comum a avaliação do custo total da obra (implantação, manutenção - vida útil), sendo o pavimento rígido mais caro para implantar, fica então em segundo plano, sendo utilizados mais em túneis e outros trechos de rodovia em que a manutenção é mais dificultosa.

3.3 DEFINIÇÃO DE TRÁFEGO

Para o dimensionamento da estrutura do pavimento, antes é necessário estimar qual a solicitação que a rodovia sofrerá ao longo de sua vida útil. Essa estimativa baseia-se no fator equivalente de operação (FEO), que consiste em associar diferentes cargas de diferentes eixos, à carga de 8,2tf aplicada em um eixo simples de roda dupla.

Há dois métodos de cálculos para a estimativa do número de solicitação de 8,2 tf que a rodovia sofrerá (N8,2tf), o método da AASHTO e do Corpo de Engenheiros norte americanos.

A informação sobre o tráfego requerida pelas equações de dimensionamento utilizadas no método AASHTO incluem tipos de eixos, cargas por eixos e números de aplicações. O procedimento de conversão de um tráfego de múltiplas configurações em um número equivalente de operações de um eixo padrão rodoviário é o mesmo considerado na aplicação do Método de Dimensionamento do DNER, á exceção da adoção dos Fatores de Equivalência de Cargas. No caso deste método, os FEC utilizados são aqueles obtidos na “Pista Experimental da AASHO”.

É interessante destacar que estudos de tráfego para obtenção do número N de operações equivalentes ao eixo padrão utilizando-se o FEC da AASHTO conduzem a resultados consideravelmente inferiores aos estudos utilizando os FEC adotados pelo Método de Dimensionamento do DNER, ou seja, FEC derivados dos estudos conduzidos por Ahvin, Foster e Turnbull para o Corpo de engenheiros do Exército Norte americano – USACE.

Assim, para uma mesma contagem volumétrica e classificatória, com os mesmos dados de pesagem e estimativa de crescimento de tráfego, para um mesmo período P de projeto, tem-se:

$$N_{AASHTO} = 0,25 N_{USACE}$$

Os fatores de equivalência utilizados pelo método do DNER permitem a conversão de aplicações de diferentes solicitações em um número equivalente de aplicações do eixo padrão (8,2tf). Para cada configuração de eixo real há uma conversão para eixo padrão. São apresentadas nas Tabelas 12 e 13 as expressões matemáticas para obtenção dos fatores de equivalência de operações.

Tabela 12: Expressões matemáticas para obtenção dos fatores de equivalência de operações, para diferentes tipos de eixos (USACE)

Tipos de Eixos	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Eixo simples	0 – 8	$FEO = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEO = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Eixo tandem duplo	0 – 11	$FEO = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEO = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Eixo tandem triplo	0 – 18	$FEO = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEO = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$
P = Peso bruto total sobre o eixo		

Fonte: Construção de Estradas e Vias Urbanas (Greco,).

Tabela 13: Expressões matemáticas para obtenção dos fatores de equivalência de operações, para diferentes tipos de eixos (AASHTO).

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Simplex de rodagem simplex	$FEO = \left(\frac{P}{7,77} \right)^{4,32}$
Simplex de rodagem dupla	$FEO = \left(\frac{P}{8,17} \right)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FEO = \left(\frac{P}{15,08} \right)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FEO = \left(\frac{P}{22,95} \right)^{4,22}$

P = Peso bruto total sobre o eixo

Fonte: Construção de Estradas e Vias Urbanas (Greco,).

3.4 MÓDULO RESILIENTE

É a relação entre a tensão desvio (σ_d), aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente (r_e) (DNIT, 2009).

O Módulo de Resiliência (MR) é análogo ao módulo de elasticidade E , sendo ambos definidos como relação entre σ_d e r_e . A diferença é que o Módulo de Resiliência é determinado em ensaio de carga repetida. Valores de pico das tensões e das deformações recuperáveis que ocorrem nos ensaios são usados para calcular a constante elástica resiliente mesmo que a tensão de pico ou deformação recuperável não ocorra ao mesmo tempo em um teste dinâmico deste tipo. Apesar de este enfoque negligenciar os efeitos da perda de energia, o uso da resposta resiliente parece dar resultados satisfatórios em cálculos de um pavimento. (Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Rio de Janeiro, 2004).

Balbo (1993, p. 106) define que para a camada de BGTC o MR ideal admitido é limitado em 15000 MPa considerando as dificuldades de se conseguir densidades próximas do limite inferior desta camada quando compactada monoliticamente.

4. PROBLEMAS GERADOS PELA MÁ GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO HAITI

São várias as consequências negativas causadas pelo fluxo irracional e descontrolado do grande volume de RCD gerado no Haiti, especificamente após o terremoto de 2010. Dentre os problemas causados por ausência de políticas públicas de gerenciamento desses resíduos, que foi denominado por PINTO (1999) de gestão corretiva, podemos destacar os impactos ambiental e econômico.

Os impactos ambientais causados pela má gestão dos RCD são devidos a não captação compromissada dos resíduos da construção civil, a inexistência de políticas públicas que disciplinem a destinação dos resíduos e tudo isso associado a um ineficaz gerenciamento ambiental de alguns agentes ligados à gestão dos RCD, impõe-se à população um expressivo número de áreas degradadas denominadas, conforme PINTO & GONZÁLES (2005), de bota-foras clandestinos ou de deposições irregulares.

Entretanto, essas áreas estão quase sempre localizadas nas periferias das cidades onde há maior número de áreas livres e nos litorais. Nas vizinhas a estas áreas, encontra-se a população mais carente, as quais são mais afetadas pelos problemas causados pela disposição incorreta dos RCD.

Independentemente das características técnicas entre os dois tipos de áreas, as duas causam os seguintes problemas ambientais:

- Os locais de deposição incorreta dos RCD provocam atração de outros tipos de resíduos como, por exemplo, resíduos domésticos, industriais, papelão e etc. e, dessa forma, tornam-se ambiente de proliferação de vetores transmissores de doenças;
- As deposições dos RCD em várzeas causam assoreamento dos cursos d'água, degradação de áreas de manancial e de proteção ambiental permanente;
- A deposição em vales pode causar instabilidade de encostas;
- O acúmulo dos resíduos em zonas de tráfego causa obstrução de vias de pedestres e de veículos;
- As deposições destes resíduos, perto de redes de drenagem, causam obstrução do sistema de drenagem.

Pela falta de informações sobre os custos do gerenciamento de resíduos no Haiti, utilizou-se os custos brasileiros para mostrar o impacto financeiro gerado pelos RCD. Conforme PINTO & GONZÁLES (2005), os RCD além de causarem impactos ambientais e, conseqüentemente, na qualidade de vida, também impactam sobre maneira a economia do país.

Conforme mostra a Tabela 14, a correção da má disposição dos RCD no ambiente urbano implica em grandes somas de recursos financeiros e comprometem de forma interligada custos sociais, tanto pessoais como públicos. Os autores explicam que os custos de cada município dependem da quantidade de mão-de-obra empregada, tipos de equipamento – caminhão, carregadeiras, tratores de esteiras, das características dos resíduos removidos, da distância de transporte dos resíduos e etc.

Brito (1999 apud John, 2000), aponta que na cidade de São Paulo a prefeitura municipal recolhe cerca de 4 mil toneladas de RCD ao custo mensal de 4,5 milhões de reais. Considerando as infrações, este valor até dezembro de 2013 é igual a 10,32 milhões de reais. Este estudo também mostra que o recolhimento dos RCD ainda pode variar entre 5,4 a 14,8 U\$/ton ou 12,27 a 33,64 U\$ hoje.

Nestes custos apontados, não estão incluídos os custos de remoção dos resíduos das obras e da disposição compromissada dos resíduos da construção civil para um ambiente saudável, pois, resumidamente, conforme Pinto (1999), esta gestão corretiva está baseada em remover os RCD de bota-foras clandestinos para outro bota-fora legalizado pelos órgãos públicos.

Tabela 14: Levantamento de custos da gestão corretiva de alguns municípios de São Paulo

Município	Operador de atividade	Tipo de remoção	Custo unitário R\$/m ³	Custo unitário R\$/ano/habitante
Guarulhos (2001)	Administração direta	Manual	43,38	3,22
		Mecânica	34,76	
Diadema (2001)	Administração direta	Manual	44,11	4,95
		Mecânica	-----	
Piracicaba (2001)	Administração direta	Manual	-----	1,04
		Mecânica	24,37	
São Paulo (2004)	Empreiteira	Manual	54,11	2,12
		Mecânica	29,62	
Salvador (2004)	Empreiteira	Manual	44,79	4,59
		Mecânica	28,67	

Fone: Adaptado de PINTO & GONZÁLES (2005).

Também, o setor da construção (exceto Obras Públicas) é um grande produtor de resíduos na França, com 31 milhões de toneladas por ano, contra 26 milhões de toneladas de lixo. O custo total da disposição desses resíduos é estimado em 2, 44 bilhões euros por ano, ou 3,3% das vendas no sector da construção e 1-8% dos lotes de ocupação (ADEME e FFB, 2011).

4.1 COMPOSIÇÃO DE ENTULHOS NO HAITI

O entulho de construção no Haiti como quaisquer outros países tem origem em três tipos de obras: construção, demolição, e reforma. Nas construções o que se encontra na sua grande maioria são materiais que ainda não foram utilizados em qualquer processo da construção, normalmente em razão do desperdício resultante da própria característica artesanal da construção. Em demolições e reformas, podem-se encontrar os materiais já na sua forma final, tal como paredes de alvenaria e pisos não revestidos, concreto armado, etc.

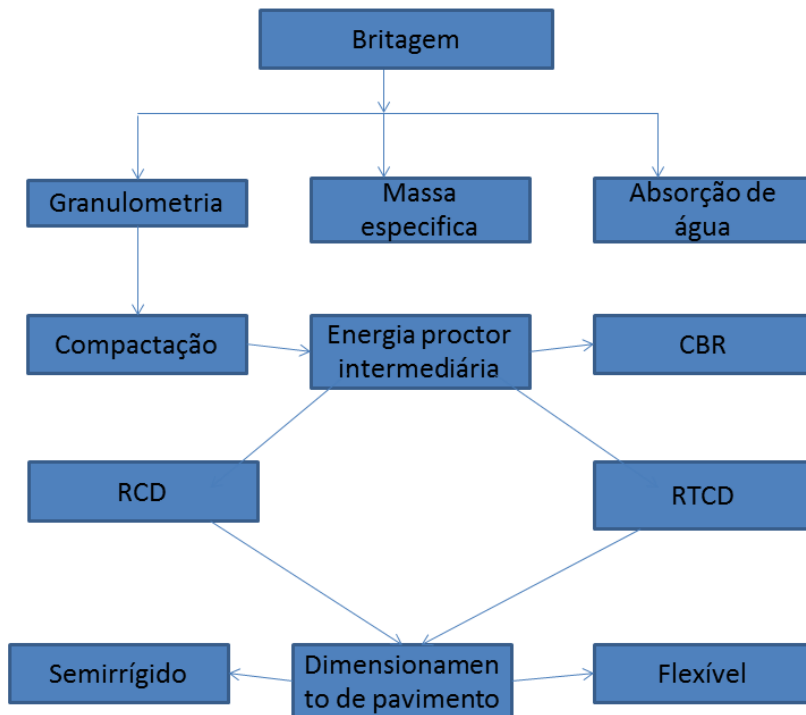
Quanto aos resíduos de entulho, provenientes de demolições e sobras de construções, sua composição é bastante variada, tanto em relação aos materiais constituintes como em relação aos diferentes locais de geração. A composição variada do entulho se verifica devido à grande quantidade de materiais envolvidos na indústria da construção civil. A geração de resíduos varia de acordo com as características da construção civil em cada região do país. No entanto, põe-se ênfase nos entulhos de materiais granulares que são feitos completamente de matérias cinza porque as construções em alvenaria no Haiti são feitas unicamente de blocos e de concreto armado. A foto 4 mostra o entulho resultante do terremoto de 2010.

Foto 4: Entulho de demolições no Haiti



5. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE PESQUISA

O fluxograma a seguir apresenta o processo seguido na elaboração deste trabalho.



No objetivo de trabalhar com um material mais próximo do aquele presente nas construções do Haiti buscou-se um material isento de argila ou de entulho vermelho. Neste sentido nosso material foi obtido de entulho das calçadas da UFSC que foram removidas para a reconstrução e reabilitação de passeios e estacionamento (Foto 5).

Foto 5: Entulho no estado original originado da reconstrução de calçadas na UFSC



5.1 PROCESSO DE RECICLAGEM

Segundo Ângulo *et al.*, 2003, a reciclagem de resíduos de construção é, de forma simplificada, um beneficiamento de mineral.

Em linhas gerais, este processo compreende um conjunto de operações unitárias que podem ser divididas em: a) concentração; b) cominuição; c) peneiramento e d) auxiliares (LUZ *et al.* 2004; CHAVES, 2002; MOTTA, 2005).

a) Operação de concentração

Segundo Luz *et al.*, 2004, os materiais de construção civil são compostos por componentes minerais misturados com outros materiais como madeira, metais restos de tintas e esmaltes e gesso. Sendo assim

para ser utilizado em diversas finalidades como nas obras rodoviárias, o resíduo deve ser submetido à retirada das substâncias estranhas à fração mineral.

A operação de concentração resume-se à separação dos diferentes componentes do resíduo de construção por processo com catação ou separação magnética, podendo ser feita antes e/ou depois de operação de redução. Como forma de facilitar a reciclagem destes materiais, a triagem de alguns componentes do resíduo no próprio local de geração já é exigida em alguns países da Europa e no Japão (SCHNEIDER, 2003; MOTTA, 2005).

Foto 6: Catação realizada em recicladora de material separada magneticamente - Belo Horizonte (MG).



Fonte: Cincongui Fernandes

Fonte: Motta, 2005.

b) Operação de cominuição

A operação de cominuição, comumente chamada de britagem, consiste em reduzir as dimensões de material para adequar o tamanho à sua finalidade ou às operações subsequentes (ÂNGULO *et al.*, 2003; CHAVES, 2002; LUZ *et al.*, 2004). Após a cominuição, os grãos tornam-se mais resistentes à compressão, se comparados ao resíduo, uma vez que a fragmentação se dá no plano de menor resistência do material. Além disso, são formadas frações mais finas que favorecem o embricamento das partículas maiores (BODI *et al.*, 1995).

Pode ser feita a britagem por diferentes tipos de equipamentos, sendo estes os mesmos ou uma adaptação daqueles utilizados em mineração. O tipo de britagem é capaz de influenciar algumas características dos agregados reciclados como graduação, forma e resistência dos grãos (LIMAS, 1999; MOTTA, 2005).

Verifica-se que na produção de agregados reciclados, usa-se de britagem primária e algumas vezes de secundária, que consistem em submeter o material ao processo de cominuição uma ou mais vezes, respectivamente. Usa-se britadores de impacto, de mandíbula ou ainda de moinho de martelo (NUNES, 2004; MOTTA, 2005).

A foto 7 ilustra o lançamento de resíduos de construção no britador de impacto de recicladora de Estoril em Belo Horizonte (MG) e a vista de um britador primário, do tipo mandíbula, pertencente a uma usina de reciclagem particular localizada em Jundáí no interior de São Paulo.

Foto 7: lançamento de resíduos de construção no britador de impacto de recicladora de Estoril em Belo Horizonte (MG) e vista de um britador primário.



Fonte: Motta, 2005.

Neste trabalho, o material foi britado sob duas formas: britagem manual (foto 8) para diminuir o tamanho dos blocos, pois o britador não podia trabalhar com tamanho grande; britagem mecânica (foto 9) num britador elétrico do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC.

Figura 8: Britagem manual e Martelo usado



Figura 9: Processo de britagem mecânica.



c) Operação de peneiramento

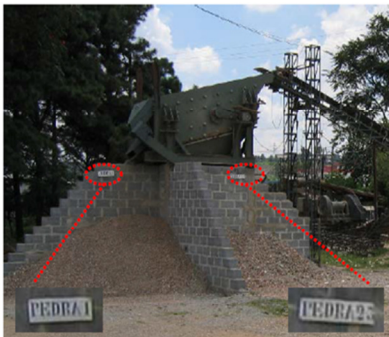
A operação de peneiramento consiste em selecionar granulometricamente os grãos passando-os por peneiras (MOTTA, 2005).

As fotos 10 e 11 mostram, respectivamente, o britador e a separação dos agregados reciclados em diferentes frações granulométricas da usina recicladora de Jundiaí (SP).

Foto 10: Vista inferior de britador em Jundiaí



Foto 11: Separação granulométrica



Fonte: Motta, 2005.

Segundo Motta (2005), a operação de peneiramento pode ser suprimida do processo de reciclagem nos casos em que haja interesse por material sem classificação granulométrica, sendo este comumente como brita corrida.

Portanto, neste trabalho, o material foi peneirado usando-se três peneiras de tamanho de aberturas diferentes, ou seja, 1" – 3/8"; 3/8" – 4; 4 – 10 e fino (Figura 12).

Foto 12: Peneiramento do material



d) Operações auxiliares

As operações auxiliares englobam todas outras etapas na preparação do material incluindo o transporte.

O processo de reciclagem pode produzir diferentes tipos de agregados. Na Holanda segundo Hendricks e Janssen (2001), são gerados agregados reciclados de concreto, alvenaria e misto para a utilização em sub-base de pavimento. No Brasil, tem-se verificado a produção de agregados reciclados dos tipos de concreto, às vezes denominado como cinza ou branco e composto basicamente de concreto e argamassa, e misto, também chamado de vermelho, cuja composição inclui diversos materiais pertencentes a classe A da Resolução CONAMA de 2002 (MOTTA, 2005).

No Haiti, por ausência de materiais cerâmicos, ou sua presença em quantidade inferior até desprezível, verifica-se que o entulho é composto unicamente de material de concreto e de blocos de argamassa, ou seja, material cinza ou branco.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL RECICLADO

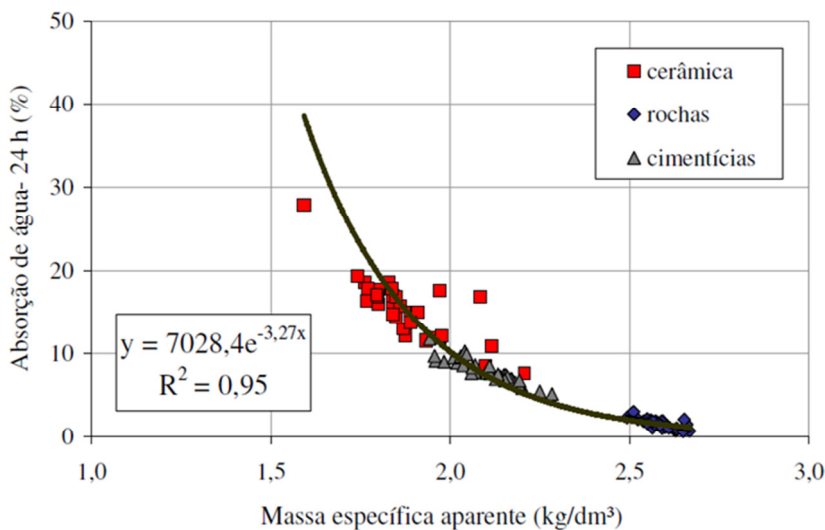
As propriedades físicas e mecânicas de agregado reciclado têm uma importância capital para o estudo de sua aplicação em pavimentação ou nas outras obras como blocos de alvenaria para a construção por que elas são relacionadas a resistência que apresenta quando submetido à uma carga que seja o tráfego ou outra.

Neste trabalho, foram analisadas as seguintes características: massa específica aparente e real, capacidade de absorção d'água.

5.3 MASSA ESPECÍFICA APARENTE E REAL

A massa específica pode ser definida como a massa por unidade de volume do material. Assim como a absorção de água, a massa específica dos agregados reciclados sofre variabilidade pela variação da porosidade, o que se pode constatar na pesquisa de Ângulo (2000) no estudo da usina de Santo André (SP), onde observou uma variabilidade da massa específica das fases componentes do agregado graúdo reciclado e também uma tendência geral daquelas com maior absorção apresentarem menor massa específica (Figura 16).

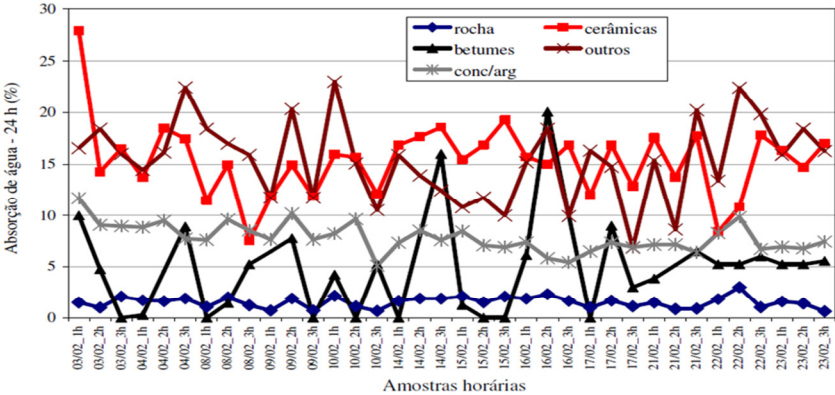
Figura 16: Correlação entre massa específica aparente e absorção de água de fases de agregado graúdo reciclado da usina de Santo André (SP), (Ângulo, 2000 apud Ângulo, 2005, Tenório, 2007).



5.4 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO D'ÁGUA

A absorção é uma das propriedades prioritárias para o uso do material granular na composição de estruturas de pavimentos, uma vez que a quantidade de água presente nas misturas pode variar dependendo da capacidade de retenção de água do material selecionado. Ângulo (2000) constatou que a absorção de cada uma das fases que compunham o agregado reciclado produzido na usina de Santo André (SP) variou e que as fases tenderam, em geral, a ser cada vez mais porosas na seguinte ordem: rochas, concretos/argamassas e cerâmicas (Figura 17). Dessa forma, é de se esperar que quanto maior for a quantidade de fases mais porosas, como a cerâmica, por exemplo, maior será a absorção do agregado.

Figura 17: Absorção de água por imersão, após 24 h de fases do agregado graúdo de RCD reciclado da usina de Santo André



Fonte: Ângulo, 2000; Tenório, 2007.

Exemplos de Hansen e Narud (1983) analisando agregados de concreto reciclado (Tabela 15), e de Poon e Chan (2006) (Tabela 15), dentre outras fontes, analisando agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos, mostram a diferença de absorção de água nos agregados reciclados de diferente granulometria.

Tabela 15: Propriedades de agregados de concreto reciclado.

Tipo de agregado	Fração granulométrica (mm)	Massa específica	Absorção de água (%)	Perda por abrasão <i>Los Angeles</i> (L500)	Volume de argamassa aderida aos grãos de rocha natural (%)
Reciclado (H)	4-8	2,34	8,5	30,1	58
	8-16	2,45	5,0	26,7	38
	16-32	2,49	3,8	22,4	35
Reciclado (M)	4-8	2,35	8,7	32,6	64
	8-16	2,44	5,4	29,2	39
	16-32	2,48	4,0	25,4	28
Reciclado (L)	4-8	2,34	8,7	41,4	61
	8-16	2,42	5,7	37,0	39
	16-32	2,49	3,7	31,5	25

Fonte: Hansen e Narud (1983)
Nota: H, M e L significam que os concretos britados (em britador de mandíbulas) eram de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

Fonte: Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais (TENÓRIO, 2007).

Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos reciclada está mostrada na Tabela 16.

Tabela 16: Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos.

Propriedade	Tamanho do agregado		
	20 mm	10 mm	< 5 mm
Absorção de água (%)	18,4	19,5	30,9

Fonte: Poon e Chan (2006)

Fonte: Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais (TENÓRIO, 2007).

Segundo Hansen e Narud (1983), a maior absorção das frações menores do agregado de concreto reciclado é devida à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos das mesmas. Poon e Chan (2006) também atribuem a maior absorção das frações menores à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos de menor tamanho.

Então, neste trabalho, o procedimento adotado para a realização do ensaio de absorção sobre o agregado de RCD graúdo se encontra na norma DNER-ME 081/98. Esse ensaio fornece o aumento percentual de massa que o agregado sofre devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, em relação à massa seca. O valor da absorção é obtido mediante a expressão:

$$Absorção(\%) = \left(\frac{M_{unida} - M_{sec\ a}}{M_{sec\ a}} \right) \times 100$$

em que: - M_{unida} : massa, ao ar do agregado na condição saturada superfície seca;

- M_{seca} : massa, ao ar, do agregado seco em estufa.

O valor de absorção calculado foi de 7,40%. Esse resultado não está tão distante de outros apresentados na Tabela 15 para o RCD de concreto.

5.5 GRANULOMETRIA DO MATERIAL

A curva de distribuição granulométrica mostra tanto o tamanho das partículas presentes em um solo como a distribuição de partículas dos diferentes tamanhos. Essa distribuição tem uma influência direta na forma com que os vazios do agregado serão ocupados pelas partículas sendo que um material granular bem graduado apresentará menor índice de vazios e mais entrosamento entre grãos, gerando um maior ângulo de atrito macroscópico.

Tendo em vista que o interesse da pesquisa é a aplicação do agregado reciclado como material de base para pavimentos, a análise granulométrica do RCD foi feita somente por peneiramento seguindo os procedimentos descritos na norma DNER-ME 080/94.

Após o peneiramento, constata-se que é composto em maior proporção de agregado retido na peneira 3/8". Em seguida vem a proporção retida na peneira 4, seguida pela proporção passada na peneira 10 (fino) e a menor proporção era do material retido na peneira 10 (foto 14).

Foto 13: Granulometria do material reciclado britado.



A NBR 15115: “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos (2004)” não especifica faixas granulométricas para utilização deste material. Portanto, prevê que alguns aspectos sejam verificados:

- Dimensão característica máxima dos grãos: 63,5 mm (tolerância de 5% da porcentagem retida, em massa na peneira de 63,5 mm), limitada a 2/3 da espessura da camada compactada;
- Granulometria: contínua e bem graduada, não uniforme, com coeficiente de uniformidade (Cu) maior ou igual a 10;
- Porcentagem de material que passa na peneira de 0,42 mm (nº 40): entre 10% e 40%;
- Índice de Suporte Califórnia (CBR) $\geq 20\%$ e expansão $\leq 1,0\%$ energia de compactação normal;
- Porcentagem de grãos de forma lamelar: deve ser menor que 30%;
- Porcentagem máxima de materiais indesejáveis, de mesma característica: 2% em massa;
- Porcentagem máxima de materiais indesejáveis de características distintas: 3% em massa;
- Deve ser isento de materiais nocivos ao meio ambiente ou à saúde do trabalhador (produtos químicos, amianto, etc).

Uma vez que essa norma de agregados reciclados não especifica faixas granulométricas, foi feita a composição granulométrica segundo a faixa granulométrica para o agregado reciclado do DEINFRA/SC (Tabela 17), como mostrado na Tabela 18.

Tabela 17: Faixa granulométrica de agregado reciclado de DEINFRA.

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando em peso (%)		Tolerância da faixa de projeto
ABNT	Abertura (mm)	II	III	
2"	50	100	100	± 7
1"	25	75 – 90	100	± 7
3/8"	9,50	40 – 75	50 – 85	± 7
Nº 4	4,75	30 – 60	35 – 65	± 5
Nº 10	2,0	20 – 45	25 – 50	± 5
Nº 40	0,425	15 – 30	15 - 30	± 2
Nº 200	0,075	5 - 15	5 - 15	± 2

Fonte: Especificações gerais para obras rodoviárias, DEINFRA-SC-ES-P-09/12.

Tabela 18: Composição granulométrica do material usada.

Composição granulométrica	
Peneira	Porcentagem (%)
3/8	32
4	17
10	18
Passante na 10	33

5.6 CURVA DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação em laboratório é geralmente usado para determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo do material analisado para uma determinada energia de compactação. É um método de estabilização mecânica que se dá por aplicação de algum tipo de energia: impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica. Seu efeito dá ao material um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade.

Neste trabalho, optou-se pela energia de compactação Proctor intermediário seguindo a norma NBR7182 da ABNT. A energia de compactação Proctor intermediário corresponde à compactação em 5 camadas com 26 golpes por camada com soquete grande de massa de 4536 g e altura de queda (guia) de 457 mm.

Seguindo-se a curva adotada, foi feita a composição granulométrica do material com a adição de 4 % de cimento Portland. A Tabela 19 mostra a composição do material cada para corpo de prova da curva de compactação.

Tabela 19: Composição granulométrica.

Peneira	%	Massa de agregado em g (96 %)	Massa de cimento (4 %)
3/8"	32	1843	240 g
4	17	980	
10	18	1037	
Fino	33	1900	

A preparação dos corpos de prova para os ensaios de compactação foi realizada em quatro etapas: pesagem, mistura e

moldagem. Foram moldados sete corpos de prova sem reuso de material para evitar a variação da granulometria do material pela quebra dos grãos pela energia nas primeiras compactações. Foram testadas 7 porcentagens de água para poder chegar na umidade ótima do material (foto 17).

Foto 14: Pesagem dos agregados



Foto 15: Pesando cimento



Foto 16: Homogeneização do material



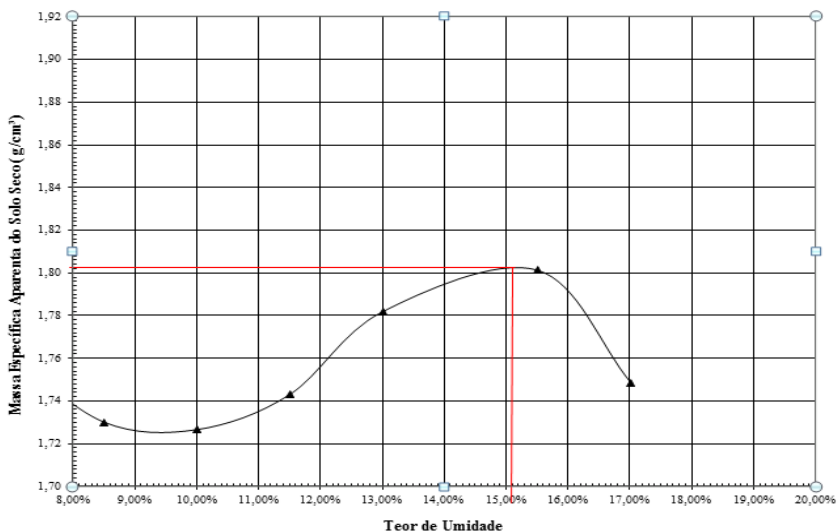
Neste trabalho, optou-se para a compactação em cilindro definido na norma NBR 7182 para a compactação Proctor intermediário como visto na foto 17.

Foto 17: Compactação do material



O resultado deste ensaio é expresso através da curva de compactação, tendo no eixo das abscissas os teores de umidade e no eixo das ordenadas os diferentes valores de massa especificado material seco. A Figura 18 apresenta a curva de compactação obtida.

Figura 18: Curvas de compactação do RCD obtida com energia Proctor intermediário.



Da curva, obteve-se a massa específica aparente seca de $\gamma_s = 1,802 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade ótima $h_{\text{ót}} = 15,10\%$.

Diversos trabalhos foram consultados a fim de fazer uma comparação entre os valores obtidos em outras pesquisas similares. Contudo, a variabilidade nos valores de umidade ótima, peso específico aparente seco e formato da curva de compactação foram muito grandes. Estas diferenças são possíveis porque diversos fatores determinam o comportamento do agregado reciclado. Esses fatores são: a origem do RCD, a sua composição, granulometria, energia de compactação, quantidade de água utilizada para compactação, entre outros. A Tabela 20 apresenta valores de umidade ótima e pesos específicos aparentes obtidos em pesquisas usando agregados reciclados.

Tabela 20: Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em diferentes RCD.

Tipo de agregado	Procedência	Energia de Compactação	wot (%)	gd (kN/m ³)	Autor
RCA	Suécia	Modificada	9	20	Arm, 2001
RCA	Coréia do Sul	Modificada	9 - 13	18,1 - 22,1	Park, 2003
AR misto	Brasília	Normal	13,5	18,1	Motta e Fernandes, 2003
		Intermediária	16,5	18,2	
		Modificada	12,5	18,4	
ARC	Belo Horizonte	Intermediária	15,	18,2	Fernandes, 2004
AR misto		Intermediária	17	17,6	
AR cerâmico	Goiânia	Intermediária	20,8	15,8	Oliveira et al, 2005
AR concreto		Intermediária	14,5	18,4	
ARCV	Uberlândia	Intermediária	19	15,6	Dias et al, 2006
ARCV		Intermediária	21	16,1	
RCA	São Paulo	Modificada	13,5	17,6	Leite et al, 2011
		Intermediária	14,5	18,3	
ARCV	Goiás	Intermediária	26	14,2	Ribeiro et al, 2002
AR Misto		Intermediária	23,1	15,8	
AR concreto		Intermediária	18,2	17,6	
AR concreto	USA	Normal	7,5	19,8	Bennert et al, 2000
ARCV	Florianópolis	Normal	12	16,6	Trichês e Kryckyj, 1999
AR concreto		Normal	13	17,5	

ACR: Agregado Reciclado de Concreto

AR: Agregado Reciclado

ARCV: Agregado Reciclado de telha Cerâmica Vermelha.

5.7 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC OU CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR - Califórnia Bearing Ratio) é a relação, em porcentagem, entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado necessário à penetração no solo até determinado ponto (0,1" e 0,2") e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em solo-padrão de brita graduada.

Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Foram realizados ensaio de CBR, para amostras de RCD compactadas na energia intermediária foto 18. As normas brasileiras NBR 15115 e 15116 dispõem que para agregados reciclados, o valor de CBR para material de base deve ser maior que 60% quando usada à energia intermediária. Este valor de referência é amplamente superado pelo RCD em análise já que o valor médio obtido foi de 105%. A expansão dos ensaios foi nula para todas as amostras. A Foto 19 mostra corpos de provas em ensaio de CBR. Os parâmetros de expansão (nula) e CBR do agregado reciclado do RCD avaliado nesta pesquisa apresentam valores bastante satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos flexíveis e semirrígidos.

Foto 18: Ensaio de CBR



Os resultados de ensaio de CBR estão apresentados na Tabela 21. No Anexo I – Ensaio de Compactação e CBR encontram-se as curvas de CBR.

Tabela 21: Resultados do ensaio de CBR

Energia	Umidade (%)	MAES (kg/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
Intermediária	13	1,90	40,6	0
	14	1,95	60,9	0
	15	1,97	67,6	0
	16	2,03	77,3	0
Modificada	15	2,22	108,2	0
	16	2,22	83,1	0

Como critério de comparação foram usados alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil com agregados reciclados. Contudo esses estudos consideram mistura em diferentes proporções de solos lateríticos ou elementos estabilizadores como cal ou cimento para as suas análises. Carneiro *et al* (2001), Oliveira *et al.* (2005) e Leite, (2006) mostraram que os valores de CBR obtidos com agregados reciclados variam entre 80 % e 115%. Conforme descrito anteriormente os valores de CBR desta pesquisa se enquadraram no intervalo de valores obtidos pelos diversos autores citados, e podem ser considerados satisfatórios para a construção de camadas de base para pavimentos flexíveis.

Apesar da recomendação das normas NBR 15115 e 15116 ser não usar o agregado reciclado em vias com alto volume de tráfego, o material empregado nesta pesquisa poderia ser usado para esta condição uma vez que o parâmetro CBR obtido para energia intermediária supera amplamente o 60% recomendado.

5.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão não-confinada, ou simples, é um tipo especial de ensaio não adensado e não drenado feito normalmente para argilas com a pressão de confinamento σ_3 igual a zero. No momento da ruptura, a tensão principal menor total é zero e a tensão vertical será a tensão principal maior σ_1 . Ensaio de compressão simples sobre amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura foram feitos. Os corpos de prova testados passaram primeiro na câmara úmida e a seguir foram levados até a ruptura na compressão não confinada. Os

corpos de prova tinham diferentes períodos de cura sendo eles: 3, 7 e 28 dias. A velocidade de aplicação de carga e o procedimento de ensaio encontram-se descrito de forma detalhada na norma ASTM D2166-06.

Com objetivo de avaliar a resistência à compressão do resíduo de construção e demolição na camada de base de pavimentação, foram adotadas camadas estabilizadas com cimento e foram utilizados 3 traços de cimento: 2%, 4% e 6% com idade de ruptura de 3 dias, 7 dias e 28 dias.

A Tabela 22 apresenta o fatorial de para avaliar a resistência à compressão simples.

Tabela 22: Número de corpos de provas por teor de cimento.

Teor de cimento (%)	Idade de ruptura		
	3 dias	7 dias	28 dias
2	3 CP	3 CP	3 CP
4	3 CP	3 CP	3 CP
6	3 CP	3 CP	3 CP

A preparação dos corpos de provas foi feita como mostrado nas fotos 19, 20, 21 e 22.

Foto 19: Material em preparação



Foto 20: Moldes usados



Foto 21: Material preparado



Foto 22: Corpo de prova moldado



Após a remoção dos moldes, os corpos de provas foram guardados na câmara úmida até os dias de ensaio (Foto 23).

Foto 23: Corpos de prova na câmara úmida



O valor da resistência à compressão simples é calculado pela relação entre a carga aplicada axialmente e a área da seção transversal do corpo-de-prova, conforme equação:

$$RCS = \frac{F}{A}$$

onde: - RCS: Resistência à compressão simples;

- F: Força aplicada;

- A: Área da seção transversal do corpo de prova.

O ensaio foi feito no Laboratório de Materiais. As fotos 24 e 25 mostram os corpos de provas no momento de ensaio.

Foto 24: Corpos de prova pronto para rompimento.



Foto 25: Corpo de prova na prensa a sob a força de compressão



São apresentados, na foto 26, corpos de provas após o seu rompimento mostrando as fissuras.

Foto 26: Corpos de prova rompidos após a aplicação da força de compressão.



Os resultados obtidos nos ensaios a compressão simples são apresentados na Tabela 23 e nas Figuras 19, 20 e 21, as curvas mostrando a evolução da resistência com as suas linhas de tendências.

Tabela 23: Resultado de ensaio de Resistência à Compressão Simples em MPa.

Cimento (%)	3dias	7dias	28 dias
	RCS	RCS	RCS
2	0,56	1,02	0,70
2	0,48	0,99	0,51
2	0,58	0,95	0,73
4	2,20	2,95	2,95
4	1,76	2,11	3,41
4	2,17	2,47	3,20
6	3,84	4,43	5,48
6	2,90	3,80	5,76
6	3,30	4,30	6,43

A norma NBR 15115 (2004) prevê a estabilização de agregado reciclado pela adição da cal e/ou de cimento Portland com o objetivo de promover uma maior resistência devendo atingir no mínimo 2,1 Mpa após 7 dias de cura.

“No caso de materiais que não atendam às exigências da alínea anterior, estes podem ser estabilizados granulometricamente, conforme a ABNT NBR 11804, ou com adição de cimento e/ou cal hidratada, e neste caso ser submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, após 7 dias de cura, devendo apresentar resistência de no mínimo 2,1 MPa, em corpos de prova moldados na energia de compactação especificada”.

Figura 19: Resistência à compressão simples dos corpos de provas aos 3 dias.

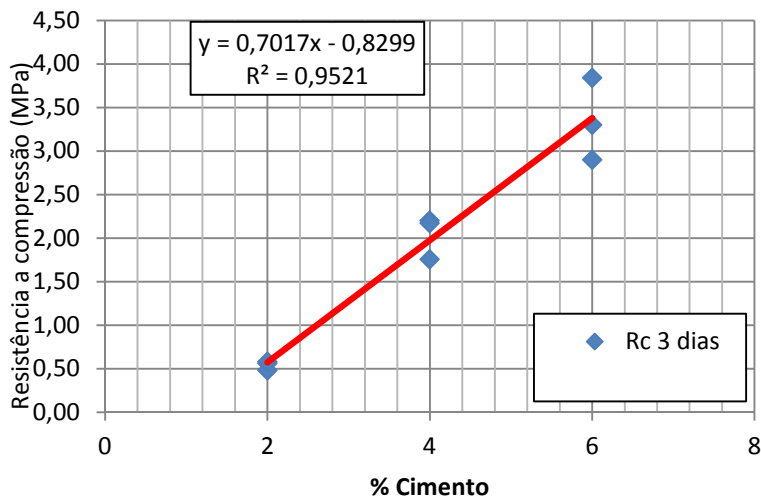


Figura 20: Resistência à compressão simples dos corpos de provas aos 7 dias.

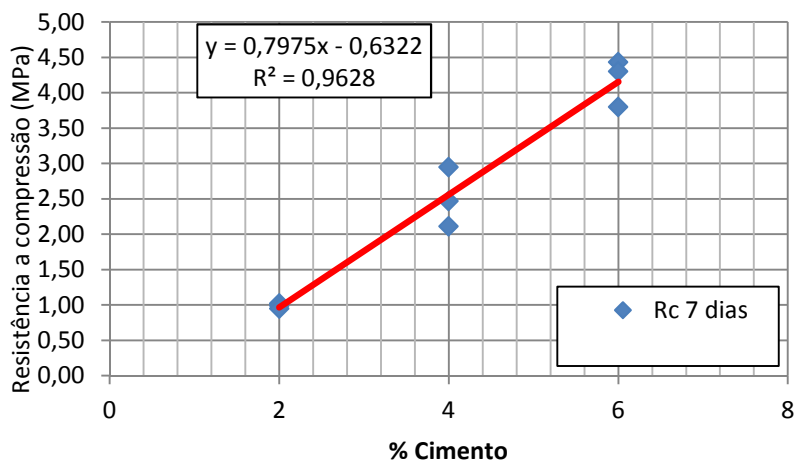
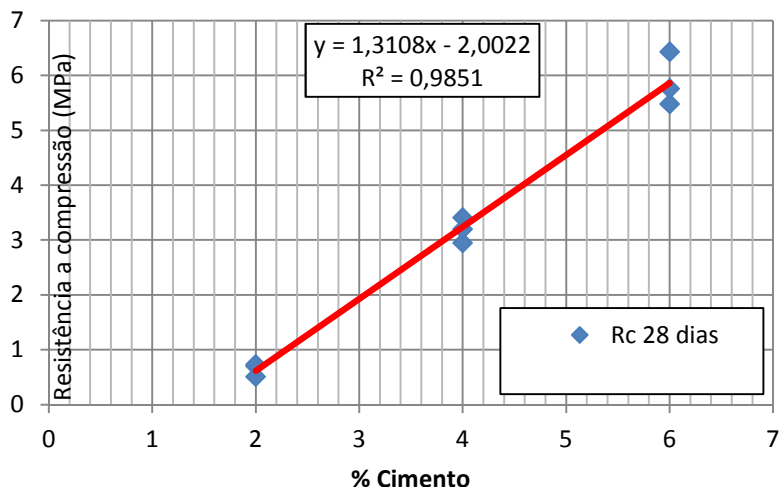


Figura 91: Resistência à compressão simples dos corpos de provas aos 7 dias.

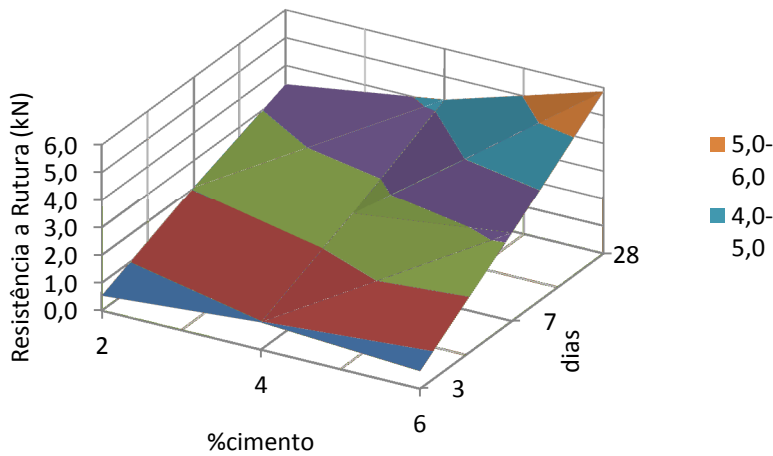


Então, foi constatado que o resultado dos corpos de provas após 7 dias com adição de 4% e 6% de cimento atingem em média valores superiores ao que prevê a norma. No cálculo da resistência média dos corpos de prova com 4% de cimento não foi considerado um corpo de prova por causa de seu valor muito baixo em relação aos outros. A Tabela 24 mostra a resistência média alcançada em função do teor de cimento e idade de cura. A Figura 22 mostra como estas variáveis se relacionam.

Tabela 24: Resistência média à compressão simples (MPa).

Teor de cimento (%)	Dias de cura		
	3 dias	7 dias	28 dias
2	0,54	0,99	0,6
4	2,20	2,51	3,19
6	3,35	4,18	5,89

Figura 22: Resistência média à compressão.



Em termos de comparação, apresenta-se na Tabela 25 os resultados de resistência média a compressão simples aos 7 e 28 dia de cura de pesquisa de Motta (2005) e que não são tão distantes do resultado deste trabalho.

Tabela 25: Resistencia à compressão simples de RCD (Motta, 2005)

Resistência média (MPa)		
% de cimento	7 dias	28 dias
4 %	2,79	4,20

5.9 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais cimentados e a mistura asfáltica. O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração (RT) foi desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro para concreto-cimento (Carneiro, 1943). A aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro gera, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro.

A popularidade deste ensaio reside não somente na facilidade e rapidez de execução, mas como também no fato de utilizar o mesmo corpo-de-prova cilíndrico e equipamento usados para a obtenção da resistência à compressão do concreto-cimento. Este ensaio também tem sido adotado para a caracterização de misturas asfálticas com a aplicação das forças através de frisos de carga no corpo-de-prova cilíndrico Marshall convencional (Falcão e al, Universidade Federal do Ceará).

No ensaio de resistência a tração por compressão diametral no caso de mistura asfáltica, a aplicação da força se dá a través de frisos metálicos de 1,27 cm de largura com curvatura adequada ao corpo-de-prova cilíndrico. Sem considerar a influencia dos frisos metálicos a resistência é calculada pela expressão:

$$RTCD = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H}$$

onde: - RTCD: Resistência à tração por compressão diametral;

- F: Carga aplicada;

- D: Diâmetro de corpo de prova;

- H: Altura de corpo de prova.

Neste trabalho foram usado corpos de prova de 6,3 cm por 10,16 cm (altura x diâmetro) e foram ensaiados no período de cura como os de compressão, ou seja, aos 3, 7 e 28 dias. As fotos 27 e 28 ilustram a moldagem dos corpos de prova e a ruptura, respectivamente. Na moldagem dos corpos de prova foi ajustado o número de golpes para se obter a mesma massa específica aparente seca máxima da curva de compactação ilustrada na Figura 18. Após a moldagem os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida até a data de ruptura (tempo de cura).

Foto 27: Moldagem dos corpos de prova.



Foto 28: Corpos de prova em ensaio de tração por compressão diametral



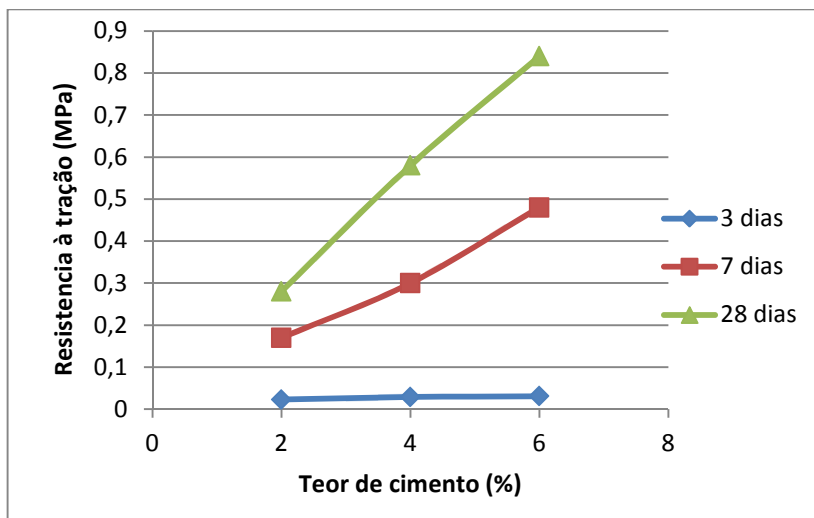
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Resistência média à tração por compressão diametral em MPa.

% de cimento	3 dias	7 dias	28 dias
2	0,023	0,17	0,28
4	0,029	0,30	0,58
6	0,031	0,48	0,84

A Figura 23 ilustra a variação da resistência à tração com o teor de cimento e idade de cura.

Figura 210: Variação da resistência à tração com o teor de cimento e idade de cura.



Para idade de cura de 28 dias, a resistência à tração pode ser estimada através do seguinte modelo:

$$RTCD = 1,41 \times (\%Cimento) + 0,01$$

$$R^2 = 0,99.$$

6. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO COM MATERIAL RECICLADO

Este dimensionamento foi feito para três níveis de tráfego no Haiti, ou seja, 1×10^6 ; 5×10^6 ; 2×10^7 considerando o número “N” de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas igual a 8,2tf. Foram considerados dois tipos de pavimento: Pavimento flexível e pavimento semirrígido.

6.1 PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO

O pavimento que está dimensionado neste trabalho é um pavimento semirrígido. Para este dimensionamento foi adotado o modelo de fadiga proposto por Trichês (1993), baseado na teoria das camadas elásticas e fundamentado nas seguintes hipóteses:

- Cada camada atua como um meio linear elástico, contínuo, homogêneo, isotrópico e infinito na direção horizontal.
- A carga de roda é representada por uma tensão vertical uniformemente distribuída, atuando sobre uma área circular;
- Cada camada é suportada de forma contínua pela camada imediatamente abaixo;
- Não são considerados os efeitos de temperatura nem das forças de inércia;
- As deformações do sistema são pequenas.

O modelo de fadiga utilizado no dimensionamento foi o seguinte (Trichês, 1993):

$$N = 10^{(14,911 - 15,074SR)} \quad (3)$$

em que SR é a relação entre a tensão na face inferior da camada cimentada (base com material reciclado estabilizado com cimento) e a resistência à tração do material reciclado. No modelo, definindo-se o N de projeto pode-se estabelecer qual a resistência à tração que o material da camada reciclada deverá apresentar.

Para o tráfego definido e considerando-se fator campo/laboratório igual a 1 tem-se:

Para $N = 2 \times 10^7$, $SR = 0,50$
 $N = 5 \times 10^6$, $SR = 0,55$
 $N = 1 \times 10^6$, $SR = 0,59$.

Foram adotados os seguintes parâmetros mecânicos dos materiais constituintes das camadas do pavimento:

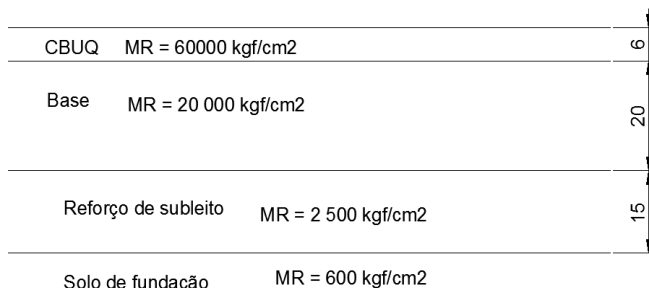
- Revestimento: Mistura asfáltica tipo CBUQ com módulo resiliente de 60.000 kgf/cm² e Poisson de 0,27;
- Base: material reciclado com cimento e módulo resiliente entre 15.000 e 20.000 kgf/cm² e Poisson de 0,20;
- Sub-base: material reciclado com módulo resiliente de 2.500 kgf/cm² e Poisson de 0,35;
- Suleito: em solo com CBR de 5% e módulo resiliente de 600 kgf/cm² e Poisson de 0,45.

O dimensionamento foi realizado compatibilizando a tensão da face inferior da camada de base com material reciclado. Na análise efetuada, as espessuras das camadas de base e sub-base foram mantidas constantes em 20cm e 15cm, respectivamente.

• **Para $N = 2 \times 10^7$**

Para este tráfego definiu-se uma espessura máxima de revestimento de 6,0 cm. Com isso, a tensão de tração na camada de base é de 3,4 kgf/cm². Para o valor de SR de 0,50, a camada de base precisaria apresentar um valor de resistência à tração de 6,8 kgf/cm². De acordo com a Figura 23, o teor de cimento necessário para atingir esta resistência a 28 dias seria de 4,8%. A Figura 24 mostra a estrutura do pavimento para atender a este tráfego.

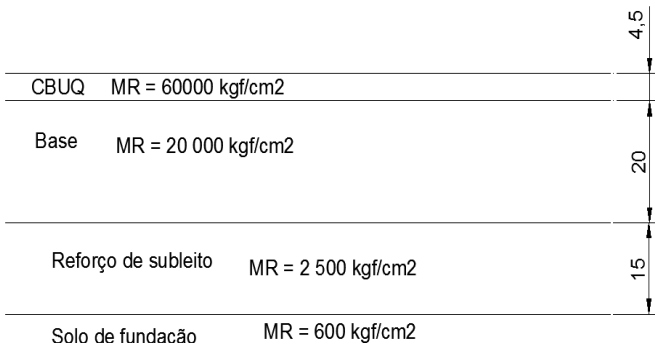
Figura 211: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 2 \times 10^7$



• **Para $N = 5 \times 10^6$**

Para este tráfego definiu-se uma espessura máxima de revestimento de 4,5 cm. Com isso, a tensão de tração na camada de base é de 3,2 kgf/cm². Para o valor de SR de 0,55, a camada de base precisaria apresentar um valor de resistência à tração de 5,8 kgf/cm². De acordo com a Figura 23, o teor de cimento necessário para atingir esta resistência seria de 4,0%. A Figura 25 mostra a estrutura do pavimento para atender a este tráfego.

Figura 212: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 5 \times 10^6$.



Para $N = 1 \times 10^6$

Para este tráfego definiu-se uma espessura máxima de revestimento de 4,0 cm. Com isso, a tensão de tração na camada de base é de 3,3 kgf/cm². Para o valor de SR de 0,59, a camada de base precisaria apresentar um valor de resistência à tração de 5,6kgf/cm². De acordo com a Figura 23, o teor de cimento necessário para atingir esta resistência seria de 4,0%. A Figura 26 mostra a estrutura do pavimento para atender a este tráfego.

Figura 213: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 1 \times 10^6$.

CBUQ	MR = 60000 kgf/cm ²	4
Base	MR = 20 000 kgf/cm ²	20
Reforço de subleito	MR = 2 500 kgf/cm ²	15
Solo de fundação	MR = 600 kgf/cm ²	

Para as camadas de revestimento asfáltico, foi feita assimilação no programa elsym5 começando de 3,5 cm como camada mínima até a camada que pode resistir às cargas aplicadas.

6.2 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

Como $CBR_p = 5\%$, optou-se por utilizar camada de reforço de subleito cujo $CBR = 8 \%$.

• Para $N = 2 \times 10^7$

Condições de dimensionamento:

- Subleito: $CBR_p = 5 \%$;
- Material da Base (material reciclado): $CBR \geq 80 \%$;
- Material da sub-base (material reciclado): $CBR \geq 40 \%$;
- Material de reforço de subleito: $CBR = 8 \%$.

Então,

$$R = 10 \text{ cm } (10^7 < N \leq 5 \times 10^7)$$

$$K_R = 2, K_B = K_S = 1 \text{ e } K_r = 1$$

$$H_{20} = 28 \text{ cm.}$$

Como o material de sub-base está com $\text{CBR} > 40$ e $N > 10^7$ substitui-se H_{20} por $1,2H_{20}$;

$$H_{20} = 1,2 \times 28 = 34 \text{ cm}$$

$$R.K_R + B.K_B \geq H_{20}$$

$$10 \times 2 + B \times 1 \geq 34$$

$$\mathbf{B \geq 14 \text{ cm} \rightarrow B = 15 \text{ cm (mínimo).}}$$

$$R.K_R + B.K_B + H_{20}.K_S \geq H_8$$

$$10 \times 2 + 15 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 54$$

$$\mathbf{h_{20} \geq 19 \text{ cm.}}$$

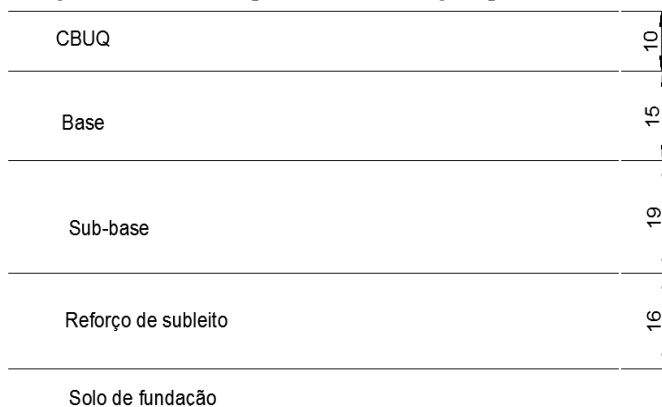
$$R.K_R + B.K_B + H_{20}.K_S + h_8.K_r \geq H_5$$

$$10 \times 2 + 15 \times 1 + 19 \times 1 + h_8 \times 1 = 70$$

$$\mathbf{H_8 = 16 \text{ cm.}}$$

A Figura 27 mostra o perfil do pavimento flexível para este tráfego.

Figura 214: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 2 \times 10^7$.



O revestimento terá que ser executado em duas camadas de CBUQ, cada uma com 5 cm de espessura. A base e a sub-base e o

reforço de subleito serão executados em uma única camada de 15 cm, 19 cm e 16 cm respectivamente.

- **Para $N = 5 \times 10^6$**

Condições de dimensionamento:

- Subleito: $\text{CBR}_p = 5 \%$;
- Material da Base (material reciclado): $\text{CBR} \geq 80 \%$;
- Material da sub-base (material reciclado): $\text{CBR} \geq 40 \%$;
- Material de reforço de subleito: $\text{CBR} = 8 \%$.

Então,

$$\mathbf{R = 7,5 \text{ cm} } (10^7 < N \leq 5 \times 10^7)$$

$$K_R = 2, K_B = K_S = 1 \text{ e } K_r = 1$$

$$H_{20} = 24 \text{ cm}$$

$$R.K_R + B.K_B \geq H_{20}$$

$$7,5 \times 2 + B \times 1 \geq 24$$

$$B \geq 9 \text{ cm} \rightarrow \mathbf{B = 15 \text{ cm} } (\text{mínimo})$$

$$R.K_R + B.K_B + H_{20}.K_S \geq H_8$$

$$7,5 \times 2 + 15 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 48$$

$$\mathbf{h_{20} \geq 18 \text{ cm.}}$$

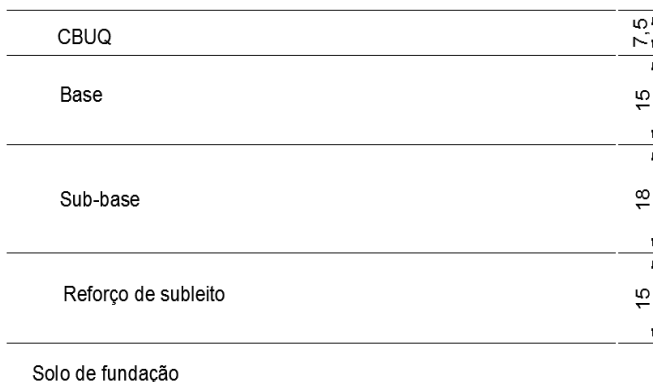
$$R.K_R + B.K_B + H_{20}.K_S + h_8.K_r \geq H_5$$

$$7,5 \times 2 + 15 \times 1 + 18 \times 1 + h_8 \times 1 = 61$$

$$H_8 = 13 \text{ cm} \rightarrow \mathbf{h_8 = 15 \text{ cm.}}$$

A Figura 28 mostra o perfil do pavimento flexível para este tráfego.

Figura 215: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 5 \times 10^6$.



O revestimento terá que ser executado em uma camada de CBUQ de 7,5 cm. A base será executada em uma única camada de 15 cm. Já a sub-base será executada em 1 camada, de 18 cm.

- **Para $N = 5 \times 10^6$**

Condições de dimensionamento:

- Subleito: $CBR_p = 5 \%$;
- Material da Base (material reciclado): $CBR \geq 80 \%$;
- Material da sub-base (material reciclado): $CBR \geq 40 \%$;
- Material de reforço de subleito: $CBR = 8 \%$.

Então,

$$H_{20} = 25 \text{ cm}$$

$$R = 3,5 \text{ cm (valor mínimo adotado).}$$

$$K_R = 2, K_B = K_S = 1 \text{ e } K_r = 1$$

Como o material de sub-base está com $\text{CBR} > 40$ e $N = 10^6$ substitui-se H_{20} por $0.8H_{20}$;

$$H_{20} = 0,8 \times 25 = 20 \text{ cm}$$

$$R.K_R + B.K_B \geq H_{20}$$

$$3,5 \times 2 + B \times 1 \geq 20$$

$$B \geq 13 \text{ cm} \rightarrow B = 15 \text{ cm.}$$

$$R.K_R + B.K_B + H_{20}.K_S \geq H_8$$

$$3,5 \times 2 + 15 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 45$$

$$h_{20} \geq 23 \text{ cm.}$$

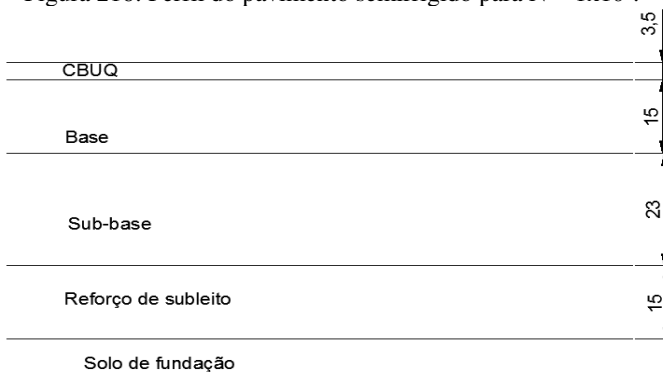
$$R.K_R + B.K_B + H_{20}.K_S + h_8.K_r \geq H_5$$

$$3,5 \times 2 + 15 \times 1 + 23 \times 1 + h_8 \times 1 = 59$$

$$H_8 = 14 \text{ cm} \rightarrow h_8 = 15 \text{ cm.}$$

A Figura 29 mostra o perfil do pavimento flexível para este tráfego.

Figura 216: Perfil do pavimento semirrígido para $N = 1 \times 10^6$.



A camada de base será executada em uma única camada de 15 cm. Como o material de sub-base e base é o mesmo, poderia se executar a camada de sub-base com 20,0cm e a camada de base com 18cm.

6.3 RESUMO DO DIMENSIONAMENTO

A Tabela 27 apresenta um resumo das estruturas dimensionadas.

Tabela 27: Resumo das estruturas dimensionadas. Espessuras em cm.

Camada	Pavimento flexível			Pavimento semirrígido		
	1x10 ⁶	5x10 ⁶	2x10 ⁷	1x10 ⁶	5x10 ⁶	2x10 ⁷
Revestimento	3,5	7,5	10,0	4,0	4,5	6,0
Base	15,0	15,0	15,0	20,0 (4%)*	20,0 (4%)	20,0 (4,8%)
Sub-base	20,0	18,0	19,0	15,0	15,0	15,0
Reforço	15,0	15,0	16,0	-	-	-

* Teor de cimento

Ressalta-se que na hipótese de se fazer um comparativo entre as espessuras dos dois tipos de pavimento, há que se levar em conta que a estrutura do pavimento semirrígido foi definida considerando-se uma análise tensão deformação da estrutura, em que pese o modelo de fadiga para o material reciclado seja referente a um concreto compactado com rolo. Entretanto, adotando-se procedimento análogo para as estruturas do pavimento flexível, isto é, adotando-se modelo de fadiga da literatura para o revestimento, é de se esperar que a espessura do revestimento asfáltico aumente em pelo menos 50%.

7. CONCLUSÕES

A publicação da resolução de CONAMA em 2002 que obriga os produtores a ser responsáveis do entulho gerado e que prescreve a importância de reciclagem desse material, faz que o emprego desses materiais em camadas de pavimentação se torne interessante, pois as obras de pavimentação consomem agregados em grande quantidade e pode ser utilizado qualquer tipo de material de classe A.

Os ensaios realizados neste trabalho mostram que o emprego de materiais reciclados de construção civil no Haiti em pavimentação é viável pois os resultados são satisfatórios e de acordo com as normas que definem as condições de emprego de material no dimensionamento de pavimentação.

O ensaio de absorção de água mostrou que o agregado reciclado absorve muita água (cerca de 7,40 %), isso devido a sua grande porosidade.

O material reciclado estudado nesta pesquisa mostrou que a sua umidade ótima é de 15 % e acima desta umidade começou a aparecer no momento de ensaio de compactação sinais de saturação.

O ensaio de CBR que deu um valor de 68 % aprova a potencial capacidade deste material na camada de base de pavimento visto que a norma prevê um $\text{CBR} \geq 60 \%$ para material reciclado.

A resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral mostra que a adição de 4 % de cimento no material reciclado proporcionou uma boa resistência para o emprego na pavimentação.

Por fim, o estudo mostrou que o emprego de resíduos de construção gerado pelo terremoto no Haiti em 2010 é promissor para ser usado na construção de pavimentos no país. No entanto, é recomendado um acompanhamento técnico qualificado para utilização do material, cuidado na compactação e na adição de água no momento de compactação que pode baixar o nível de compactação do material o que levaria a falha do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECOM: História do Entulho. Disponível em <http://www.abrecon.com.br/Conteudo/7/Entulho.aspx>.
Visitado no dia 12/05/2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT: NBR 15115/2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10.004 – Classificação de resíduos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7181: Análise granulométrica.

Code de l'Environnement ; Version consolidée du code au 8 juin 2013.
Edition : 2013-06-09, França.

DEPARTEMENT DE LA SECURITE ET DE L'ENVIRONNEMENT (DSE) : Recyclage des déchets minéraux de chantier dans le canton de Vaud . SESA, Février 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Manual de estudos de tráfego*. Ministério dos Transportes. Publicação IPR 723. 2006.

FEDERATION CANADIENNE DES MUNICIPALITES: Les déchets solides, une ressource à exploiter

FONDATION FRANÇAISE DU BATIMENT (FFB): Mieux gérer les déchets de chantier de bâtiment.

Gilson T. A. P. J: Aplicação dos resíduos da construção civil (RCC) gerados no município de Santa Maria.

Glicério T.: Concreto Compactado a rolo para aplicação em pavimento: Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento, Tese, Dezembro 1993.

INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT : guide de gestion des déchets de Construction et de démolition (Version décembre 2009). Disponível em www.bruxellesenvironnement.be

Isabela M. F.: Os resíduos de construção civil no município de Araraquara/SP

Liedi B. B. e al.: Pavimentação asfáltica, Formação Básica para Engenheiros, Rio Janeiro 2008.

Luisette A. Karpinski e al.: Gestão diferenciada de resíduos da construção civil, uma abordagem ambiental.

NORME: DEVP1022585A: Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes; França.

NORME: ENVX9200049L: Loi no 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement, 1992, França.

Rosângela S. M e al.: Aplicação de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil em camadas de pavimentos.

Tarcísio P. P. e al.: Gestão ambiental de resíduos da construção civil. A experiência do SindusCon/SP.

Valmir B.: Pavimentação Sustentável: Reaproveitamento do resíduo da construção civil e de material fresado com espuma de asfalto.

MINISTERIO DE DA ECOLOGIA, DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL E DE ENERGIA: Circulaire du 15/02/00 relative a la planification de la gestion des dechets de chantier du batiment et des travaux publics (BPT), França.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (CSTC): Remploi des Gravats et Dechets de Construction sous Forme de Granulats dans le Beton, 1993, Belgica.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION (CSTC) : Les Dechets de Construction et de Demolition : Possibilites de Recyclage sous Forme de Granulats dans Le Beton, 1993, Belgica.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Manual de pavimentação.* Ministério dos Transportes. Publicação IPR 719, 2006, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) *Manual de restauração de pavimentos asfálticos.* Publicação IPR 720. Ministério dos Transportes. 2006, Brasil.

INTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT (IBGE): Guide de gestion des déchets de construction et de démolition, 2009. Disponível em www.bruxellesenvironnement.be. Visitado no dia 15/12/2013.

DEINFRA. Especificações Gerais para Obras Rodoviárias, DEINFRA-SC-ES-P-09/12.

INSTITUT DES ROUTES, DES RUES ET DES INFRASTRUCTURES POUR LA MOBILITE (IDRRIM) . Classification et Aide au Choix Des Materiaux Granulaires Recycles pour leurs Usages Routiers hors Agregats d'enrobés, N°22 Fevrier 2011.

George B. S. : Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no Estudo de materiais de pavimentação; Universidade Federal do Ceará.

GUIDE TECHNIQUE POUR L'UTILISATION DES MATERIAUX ALTERNATIFS DE BOURGOGNE : Les Graves de Recyclage Issues de la Déconstruction du BTP.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE (ADEME) . Gestion et Valorisation des Déchets de

Chantier de Construction, Disponível em Www.Ademe.Fr. Visitado no Dia 24/06/2014.

MEDINA, J. M, L.M.G. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

TENÓRIO, J. J. L. (2007). Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.

Jaques M. Recyclage des matériaux et évaluation environnementale.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY BY FRANKLIN ASSOCIATES, Ltd : Caractérisation of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States, prepared for the U.S., June 1998.

Rosângela S. M.: Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego, SP 2005.

NIDAGRAVEL: Stabilisation de Gravier, Disponível em Www.Nidagravel.Eu. Visitado 15/03/2014.

Tatiane G. N. : Caracterização dos Resíduos da Construção Civil da Cidade de Criciúma/SC, UNESC.

Alex P. C. e al: Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção, Salvador 2001.

SOCIETE QUEBECOISE DE RECUPERATION ET DE RECYCLAGE, RECYC-QUEBEC: Sur le Recyclage des Matériaux Secs, 1999, Bibliothèque Nationale du Québec.